Metrología dimensional:
Resumen de teoría y problemas resueltos

Silvia Sánchez Salinas
Marta Gómez Galán

TEXTOS DOCENTES
nº 27

edual editorial UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

Metrología dimensional:
Resumen de teoría y problemas resueltos

© del texto:
Silvia Sánchez Salinas
Marta Gómez Galán

Colección Textos Docentes nº 27
© Editorial Universidad de Almería, 2019
editorial@ual.es
www.ual.es/editorial
Telf/Fax: 950 015459
¤
ISBN: 978-84-17261-45-0
Depósito legal: AL 1119-2019

edual editorial UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

En este libro puede volver al índice
pulsando el pie de la página

Índice

Presentación **6**

Introducción **7**

Terminología y definiciones básicas 8

Sistema Internacional de unidades y reglas de escritura 9

El laboratorio de metrología 13

Tema 1. Incertidumbre en la medida **15**

1.1 Fundamento teórico 15

1.2 Problemas resueltos 18

1.2.1 Problema 1 18

1.2.2 Problema 2 19

1.2.3 Problema 3 20

1.3 Problemas propuestos 22

1.3.1 Problema propuesto 1 22

1.3.2 Problema propuesto 2 22

1.3.3 Problema propuesto 3 23

1.3.4 Problema propuesto 4 23

Tema 2. Criterios de rechazo de datos **24**

2.1 Fundamento teórico 24

Prueba de Dixon 24

Prueba de Grubbs 25

Criterio de Chauvenet 27

2.2 Problemas resueltos 28

2.2.1 Problema 1 28

2.2.2 Problema 2 31

2.2.3 Problema 3 33

2.3 Problemas propuestos 35

2.3.1 Problema propuesto 1 35

2.3.2 Problema propuesto 2 35

2.3.3 Problema propuesto 3 35

Tema 3. Calibración de instrumentos de medida **36**

3.1 Fundamento teórico 36

Procedimiento de calibración de un instrumento de medida 38

3.2 Problemas resueltos 40
3.2.1 Problema 1 40
3.3 Problemas propuestos 44
3.3.1 Problema propuesto 1 44
Tema 4. Tolerancias dimensionales 45
4.1 Fundamento teórico 45
Normalización 46
Términos y definiciones 46
Grupos dimensionales 47
Calidad de la tolerancia 48
Cálculo de la tolerancia 49
Posición de la zona de tolerancia 50
Zonas de tolerancia preferentes 52
Tolerancias dimensionales sin indicación individual de tolerancia 53
4.2 Problemas resueltos 56
4.2.1 Problema 1 56
4.2.2 Problema 2 56
4.2.3 Problema 3 57
4.2.4 Problema 4 57
4.2.5 Problema 5 58
4.3 Problemas propuestos 60
4.3.1 Problema propuesto 1 60
4.3.2 Problema propuesto 2 60
Tema 5. Ajustes 61
5.1 Fundamento teórico 61
Ajuste con juego 62
Ajuste con aprieto 62
Ajuste incierto o indeterminado 63
Designación del ajuste 64
Sistemas de ajustes 64
Elección del ajuste 64
5.2 Problemas resueltos 66
5.2.1 Problema 1 66
5.2.2 Problema 2 67
5.2.3 Problema 3 69
5.2.4 Problema 4 71
5.2.5 Problema 5 74

5.3 Problemas propuestos 79
5.3.1 Problema propuesto 1 79
5.3.2 Problema propuesto 2 79
5.3.3 Problema propuesto 3 79
Tema 6. Rugosidad superficial 80
6.1 Fundamento teórico 80
6.2 Problemas resueltos 85
6.2.1 Problema 1 85
6.3 Problemas propuestos 86
6.3.1 Problema propuesto 1 86
Tema 7. Dureza superficial 87
7.1 Fundamento teórico 87
Ensayo Brinell 88
Ensayo Vickers 90
Ensayo Rockwell 91
7.2 Problemas resueltos 95
7.2.1 Problema 1 95
7.2.2 Problema 2 96
7.3 Problemas propuestos 97
7.3.1 Problema propuesto 1 97
7.3.2 Problema propuesto 2 97
7.3.3 Problema propuesto 3 97
Bibliografía 98
Formulario 99
ANEXOS 102
ANEXO I: BLOQUES PATRÓN LONGITUDINALES 102

Presentación

El contenido de esta obra está encuadrado en el de un curso de Metrología para estudiantes de ingeniería mecánica; y, en concreto, constituye una relación de problemas base de la asignatura de Metrología y Calidad Industrial de la titulación de Grado en Ingeniería Mecánica en la Universidad de Almería. El libro de problemas consta de siete temas en los que se abordan los contenidos prácticos de la asignatura como son la incertidumbre en la medida, criterio de rechazo de datos, calibración de instrumentos de medida, tolerancias dimensionales y ajustes, rugosidad superficial y dureza superficial. De cada uno de los temas se realizará una introducción teórica, se resolverán problemas relacionados con la misma y se propondrán ejercicios para afianzar los conocimientos del alumno.

Introducción

En la actualidad, las empresas deben adaptar su funcionamiento mediante un enfoque basado en la calidad, con la finalidad de que los productos fabricados cumplan los requisitos previamente especificados. Para comprobar que dichos productos cumplen las especificaciones requeridas es requisito indispensable disponer de procedimientos de medida y de instrumentos adecuados para llevar a cabo dicha tarea.

Estos procedimientos de medición deben llevarse a cabo con instrumentos correctamente calibrados y de precisión conocida, además de ser utilizados por personal cualificado, de modo que se pueda asegurar que las mediciones realizadas son correctas. En cualquier otro caso, la medida realizada carecerá de valor.

La presente obra se centra en el campo de estudio de la Metrología Dimensional por lo que resulta de interés definir qué es la metrología y los conceptos básicos a tener en cuenta para la comprensión de este texto. Se define ***Metrología*** como *la ciencia que estudia las técnicas de medición, con un grado de precisión adecuado, así como todos los aspectos relacionados con las unidades de medida*. Este concepto no se debe confundir con el de *Metrotecnia* que es *la parte de la Metrología que abarca los procedimientos de medida y la forma correcta de realizar dichas mediciones*.

Por otro lado, la metrología abarca diversos campos que se pueden englobar en tres principales: Metrología Científica, Metrología Industrial y Metrología Legal. La *Metrología Científica* es la rama de la metrología que se ocupa de la organización y el desarrollo de los patrones de medida y del mantenimiento de los mismos, así como de la determinación de las constantes físicas. En España la realizan, además del Centro Español de Metrología (CEM), sus laboratorios asociados. La *Metrología Industrial*, es aquella que asegura las mediciones necesarias que garantizan la calidad de los productos por lo que su función principal es la de calibrar, controlar y mantener en óptimas condiciones los equipos de medición empleados en los procesos que aseguran que los productos están conforme a las normas establecidas. Según el CEM, la *Metrología Legal* es el campo de la metrología que contempla las actividades por las que se establecen las exigencias legales sobre las medidas, unidades de medida, instrumentos de medida y métodos de medida, cuyos resultados puedan tener influencia sobre la transparencia de transacciones comerciales, la salud o la seguridad de consumidores y usuarios, así como sobre el medio ambiente con el fin de garantizar con un nivel apropiado de credibilidad en los resultados en el marco de una reglamentación nacional o europea.

La *Metrología Dimensional* abarca dos grandes campos: la *macrogeometría*, referida a las mediciones de dimensiones (longitud y angularidad) y formas (rectitud, paralelismo, perpendicularidad, etc.) y, la *microgeometría*, referida a la medición del acabado superficial, por ejemplo, la rugosidad.

Antes de comenzar a desarrollar los contenidos del presente texto, se hará un repaso sobre los conceptos básicos a tener en cuenta en el campo de la metrología, de modo que sea más fácil el entendimiento del mismo. Es conveniente remarcar que no se abordan todos los contenidos y campos de la metrología dimensional, sino que únicamente se recogen aquellos conceptos que serán de utilidad para la compresión y realización de los problemas recogidos en este texto.

Terminología y definiciones básicas

Trazabilidad: propiedad de una medida por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia (patrón de calidad superior, nacional o internacional) mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida.

Patrón: realización de la definición de una magnitud dada, con un valor determinado y una incertidumbre de medida asociada, tomada como referencia.

Magnitud Física: aquella característica observable y medible de un fenómeno o cuerpo, caracterizado por su naturaleza, su unidad y su valor numérico o medida.

Medición: proceso que consiste en obtener experimentalmente uno o varios valores que pueden atribuirse razonablemente a una magnitud.

Valor medido: valor efectivo que suministra el instrumento de medida.

Valor verdadero: valor desconocido cuya magnitud se pretende determinar mediante la aplicación de un determinado instrumento de medida. Es imposible determinar con total precisión el valor verdadero de una magnitud.

Campo de medida: intervalo de los valores de magnitudes de una misma naturaleza que un instrumento de medida dado puede medir con una incertidumbre instrumental especificada, en unas condiciones determinadas

Precisión: es la cualidad de un instrumento de proporcionar valores próximos al valor verdadero de la magnitud que se quiere medir.

Sensibilidad: cociente entre la variación de una indicación de un instrumento de medida y la variación correspondiente del valor de la magnitud medida.

Incertidumbre: parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mesurando, a partir de la información que se utiliza. En general, la incertidumbre de medida incluye numerosas componentes. Algunas pueden calcularse mediante una evaluación tipo A de la incertidumbre de medida, a partir de la distribución estadística de los valores que proceden de las series de mediciones y pueden caracterizarse por desviaciones típicas. Las otras componentes, que pueden calcularse mediante una evaluación tipo B de la incertidumbre de medida, pueden caracterizarse también por desviaciones típicas, evaluadas a partir de funciones de densidad de probabilidad basadas en la experiencia u otra información.

Calibración: proceso que consiste en evaluar la capacidad de un instrumento de medida para determinar una magnitud conocida (patrón). Como resultado de dicha operación se obtendrá una variabilidad en las medidas realizadas sobre el patrón, cuya magnitud e incertidumbre son conocidas, siendo posible establecer mediante los procedimientos

adecuados la precisión de dicho instrumento y la diferencia entre el valor del patrón y la media de los valores proporcionados por el instrumento al medir dicho patrón.

Resultado de una medida: es el valor que se le atribuye a un mesurando mediante la aplicación de un instrumento de medida. Este resultado está formado por el valor del mesurando, la unidad de medida, el valor de la incertidumbre y el nivel de confianza empleado en la determinación de la incertidumbre (el denominado factor de cobertura).

Repetibilidad: grado de concordancia entre las medidas realizadas con el mismo método de medida, es decir, con el mismo instrumento, mismo operario, iguales condiciones ambientales y en intervalos de tiempo lo suficientemente próximos.

Para poder garantizar el resultado correcto de una medida es necesario asegurar la trazabilidad además de utilizar instrumentos de medida correctamente calibrados que sean utilizados de forma óptima por personal cualificado. Sin olvidar que siempre se obtendrá una medida con una cierta incertidumbre que puede ser debida a diversos factores como la inexperiencia del operador de medida, uso inadecuado de los instrumentos de medida, condiciones ambientales, etc.

Sistema Internacional de unidades y reglas de escritura

Otro de los aspectos fundamentales a tener en cuenta en el campo de la metrología es la conformidad con el Sistema Internacional de Unidades, ya que cualquier medida sin su unidad correspondiente carece de valor; así como las reglas de escritura de las mismas para identificar correctamente cualquier medición que se realice.

Tabla 0-1. Unidades básicas del SI.

Magnitud	Nombre de la unidad	Símbolo de la unidad
Longitud.	Metro.	m
Masa.	Kilogramo.	kg
Tiempo, duración.	Segundo.	s
Corriente eléctrica.	Amperio.	A
Temperatura termodinámica.	Kelvin.	K
Cantidad de sustancia.	Mol.	mol
Intensidad luminosa.	Candela.	cd

El valor de una magnitud se expresa como el producto de un número por una unidad que es un valor particular de la magnitud considerada, tomada como referencia. Para una magnitud concreta, se pueden utilizar numerosas unidades alternativas. Por ejemplo, si se está considerando una velocidad, se puede dar la magnitud en unidades de m/s, km/h, etc. Sin embargo, debido a la importancia de contar con un conjunto de unidades bien definidas y conocidas universalmente, las unidades deben elegirse de forma que sean comprensibles por todo el mundo, constantes en el tiempo y en el espacio, y fáciles de materializar con gran exactitud. Para ello, se definen las *unidades básicas*, a partir de las cuales se pueden definir todas las demás unidades, llamadas *unidades derivadas*, obtenidas como productos de potencias de las unidades básicas. Cada magnitud básica está identificada por su nombre y por

su símbolo. El Sistema Internacional de Unidades (SI) adoptado por la Conferencia General de Pesas y Medidas vigente en la Unión Europea, establece siete magnitudes básicas, las cuales ser recogen en la Tabla 0-1.

En cuanto a las unidades derivadas del SI, existen las expresadas a partir de las unidades básicas (Tabla 0-2) y otras que han recibido nombres y símbolos especiales (Tabla 0-3).

Tabla 0-2. Ejemplos de unidades SI derivadas coherentes expresadas a partir de las unidades básicas.

Magnitud derivada		Unidad SI derivada coherente	
Nombre	Símbolo	Nombre	Símbolo
Área, superficie.	A	Metro cuadrado.	m^2
Volumen.	V	Metro cúbico.	m^3
Velocidad.	v	Metro por segundo.	m/s
Aceleración.	a	Metro por segundo cuadrado.	m/s^2
Número de ondas.	σ, v	Metro a la potencia menos uno.	m^{-1}
Densidad, masa en volumen.	ρ	Kilogramo por metro cúbico.	kg/m^3
Densidad superficial.	ρ A	Kilogramo por metro cuadrado.	kg/m^2
Volumen específico.	v	Metro cúbico por kilogramo.	m^3/kg
Densidad de corriente.	j	Amperio por metro cuadrado.	A/m^2
Campo magnético.	H	Amperio por metro.	A/m
Concentración de cantidad de concentración.	c	Mol por metro cúbico.	mol/m^3
Concentración másica.	ρ, γ	Kilogramo por metro cúbico.	kg/m^3
Luminancia.	L_v	Candela por metro cuadrado.	cd/m^2
Índice de refracción.	N	Uno.	1
Permeabilidad relativa.	μr	Uno.	1

Tabla 0-3. Unidades SI derivadas coherentes con nombres y símbolos especiales.

Magnitud derivada	Unidad derivada			
	Nombre	Símbolo	Expresión mediante otras unidades SI	Expresión en unidades SI básicas
Ángulo plano.	Radián[(a)].	rad	1[(a)]	m/m
Ángulo sólido.	Estereorradián[(a)].	sr(c)	1[(a)]	m^2/m^2
Frecuencia.	Hercio.	Hz	–	s^{-1}
Fuerza.	Newton.	N	–	$m\ kg\ s^{-2}$
Presión, tensión.	Pascal.	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
Energía, trabajo, cantidad de calor.	Julio.	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
Potencia, flujo energético.	Vatio.	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
Carga eléctrica, cantidad de electricidad.	Culombio.	C	–	s A
Diferencia de potencial eléctrico, fuerza electromotriz.	Voltio.	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
Capacidad eléctrica.	Faradio.	F	C/V	$m^{-2}\ kg{-}1\ s^4\ A^2$
Resistencia eléctrica.	Ohmio.	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
Conductancia eléctrica.	Siemens.	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
Flujo magnético.	Weber.	Wb	V s	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$

Magnitud derivada	Unidad derivada			
	Nombre	Símbolo	Expresión mediante otras unidades SI	Expresión en unidades SI básicas
Densidad de flujo magnético[(h)].	Tesla.	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
Inductancia.	Henrio.	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
Temperatura celsius.	Grado celsius.	^oC	–	K
Flujo luminoso.	Lumen.	lm	cd sr[(c)]	cd
Iluminancia.	Lux.	lx	lm/m^2	m^{-2} cd
Actividad de un radionucleido.	Becquerel[(d)].	Bq	–	s^{-1}
Dosis absorbida, energía másica (comunicada), kerma.	Gray.	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
Dosis equivalente, dosis equivalente ambiental, dosis equivalente direccional, dosis equivalente individual.	Sievert.	Sy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
Actividad catalítica.	Katal.	kat	–	s^{-1} mol

(a) El radián y el estereorradián son nombres especiales del número uno, que pueden usarse para proporcionar información respecto a la magnitud a que afectan. En la práctica, los símbolos rad y sr se emplean donde sea apropiado, mientras que el símbolo de la unidad derivada «uno» generalmente no se menciona cuando se dan valores de magnitudes adimensionales.

Además de las unidades básicas y derivadas anteriormente comentadas, es habitual el empleo de algunas otras unidades que, aunque no pertenecen al SI, su uso ha sido aceptado, dado que son ampliamente utilizadas en la vida cotidiana y cada una de ellas tiene una definición exacta en unidades SI (Tabla 0-4). Incluye las unidades tradicionales de tiempo y de ángulo. Contiene también la hectárea, el litro y la tonelada, que son todas de uso corriente a nivel mundial, y que difieren de las unidades SI coherentes correspondientes en un factor igual a una potencia entera de diez.

Tabla 0-4. Unidades no pertenecientes al SI cuyo uso es aceptado por el Sistema y están autorizadas.

Magnitud	Nombre de la unidad	Símbolo	Valor en unidades SI
Tiempo.	Minuto. Hora. Día.	min h d	1 min = 60 s 1 h = 60 min = 3600 s 1 d = 24 h = 86 400 s
Ángulo plano.	Grado. Minuto. Segundo.	^{o} ’ ”	$1\ ^o = (\pi/180)$ rad $1’ = (1/60)\ ^o = (\pi/\ 10\ 800)$ rad $1” = (1/60)’ = (\pi/\ 648\ 000)$ rad
Área.	Hectárea.	ha	$1\ ha = 1\ hm^2 = 10^4\ m^2$
Volumen.	Litro.	L, l	$1\ L = 1\ l = 1\ dm^3 = 103\ cm^3 = 10^{-3}\ m^3$
Masa.	Tonelada.	t	$1\ t = 10^3$ kg

En cuanto a la expresión de una magnitud, hay una serie de reglas de escritura que hay que tener en cuenta. Las principales reglas de escritura son las siguientes:

1. Los símbolos de las unidades se escriben en caracteres romanos y en minúsculas excepto si derivan de un nombre propio, en cuyo caso la primera letra es mayúscula.

Como excepción se permite el uso de la letra L en mayúscula o l en minúscula como símbolos del litro, a fin de evitar la confusión entre la cifra 1 (uno) y la letra l (ele).

2. Un prefijo de múltiplo o submúltiplo forma parte de la unidad y precede al símbolo de la unidad, sin espacio entre el símbolo del prefijo y el símbolo de la unidad, siendo los prefijos autorizados por el SI los indicados en la Tabla 0-5.

Tabla 0-5. Prefijos del SI.

Factor	Nombre	Símbolo	Factor	Nombre	Símbolo
10^{1}	Deca.	da	10^{-1}	Deci.	d
10^{2}	Hecto.	h	10^{-2}	Centi.	c
10^{3}	Kilo.	k	10^{-3}	Mili.	m
10^{6}	Mega.	M	10^{-6}	Micro.	µ
10^{9}	Giga.	G	10^{-9}	Nano.	n
10^{12}	Tera.	T	10^{-12}	Pico.	p
10^{15}	Peta.	P	10^{-15}	Femto.	t
10^{18}	Exa.	E	10^{-18}	Atto.	a
10^{21}	Zetta.	Z	10^{-21}	Zepto.	z
10^{24}	Yotta.	Y	10^{-24}	Yocto.	Y

3. Los símbolos de las unidades son entidades matemáticas y no abreviaturas por lo que no van seguidos de un punto, salvo al final de una frase, ni se usa el plural ni se permite emplear abreviaturas para los símbolos y nombres de las unidades.

4. Los nombres de las unidades se imprimen en caracteres romanos (rectos) y se consideran como nombres (sustantivos) comunes de modo que empiezan por minúscula salvo que se encuentren situados al comienzo de una frase o en un texto en mayúsculas.

5. El valor numérico precede siempre a la unidad y siempre se deja un espacio entre el número y la unidad excepto los símbolos de unidad del grado, el minuto y el segundo de ángulo plano, para los cuales no se deja espacio entre el valor numérico y el símbolo de unidad.

6. El símbolo utilizado para separar la parte entera de un número de su parte decimal siempre es la coma.

7. Los números con muchas cifras pueden repartirse en grupos de tres cifras separadas por un espacio, a fin de facilitar la lectura. Estos grupos no se separan nunca por puntos ni por comas.

En resumen, para expresar correctamente una magnitud siempre hay que dar el valor numérico de la misma, sucedido por el símbolo de su unidad, correctamente escrito según las reglas anteriores.

El laboratorio de metrología

El resultado de una medición siempre conlleva un cierto factor de incertidumbre. Parte de esta incertidumbre es debida a las condiciones ambientales a la hora de realizar la misma de modo que es muy importante controlarlas para disminuir al máximo la incertidumbre y dar un valor de la medida más acertado.

Los objetivos principales de los laboratorios de metrología son proporcionar medidas de precisión y dar calibración a los equipos de los departamentos de control de calidad de los diferentes talleres de fabricación y para ello deben de reunir una serie de condiciones constructivas y ambientales.

Condiciones constructivas de los laboratorios de metrología

La situación ideal para los laboratorios de metrología son los sótanos con dos puertas de acceso: la primera, para el acceso de los técnicos durante el trabajo diario y, la segunda, para la entrada de equipo y a efectos de seguridad. Lo ideal es que los laboratorios no tengan ventanas y, si las tienen, deben tener doble cristal aislante y deben estar orientadas al norte. En cuanto a la construcción de las paredes, deben utilizarse materiales para el aislamiento térmico, acústico y de humedad para que una vez creada en su interior la atmósfera de trabajo adecuada no haya pérdidas hacia el exterior a través de paredes o ventanas. El techo debe tener una protección impermeabilizante contra la lluvia (si está en sótano ya tiene la protección por las plantas superiores), debe tener cámara de aire y debe evitarse la escayola. Por último, el suelo, debe estar protegido contra vibraciones que puedan alterar los procesos de medición y debe ser de madera o hule grueso para preservar las condiciones de trabajo.

Condiciones ambientales de los laboratorios de metrología

Para un óptimo funcionamiento de un laboratorio de metrología dimensional es absolutamente necesario el control de las condiciones ambientales y su estabilidad temporal dentro de estrechos rangos de tolerancia. Las principales condiciones ambientales a tener en cuenta son las siguientes:

- *Temperatura:* el laboratorio debe estar a 20°C con una desviación como máximo de 2°C a la hora (en el caso de laboratorios patrón, únicamente puede haber una variación de 2°C cada 4 horas).

- *Humedad relativa:* debe estar comprendida entre el 40% y el 50%.

- *Polvo:* el laboratorio debe tener una atmósfera libre de polvo. El valor máximo para el nivel de polvo permitido es de 200 partículas/cm^3. Además, dichas partículas deben ser menores de 1 µm de diámetro por lo que el laboratorio debe estar provisto de filtros de partículas en los sistemas de ventilación que sean capaces de regular dichas condiciones.

- *Velocidad de circulación de aire:* debe ser menor de 0,15 m/s en el puesto de trabajo.

- *Ruido:* el ruido en el laboratorio debe ser menor de 60 dB.

- *Iluminación:* cada puesto de trabajo debe estar provisto de una iluminación entre 800-1000 lux y debe haber una iluminación de más de 550 lux en cualquier punto del laboratorio. Las lámparas adecuadas son las lámparas fluorescentes con difusor.

Teniendo controladas las condiciones ambientales, se conseguirán mediciones de más calidad y precisión, disminuyendo el factor de incertidumbre que afecta a estas condiciones.

Tema 1. Incertidumbre en la medida

1.1 Fundamento teórico

Como se ha adelantado en la introducción, el valor verdadero de una magnitud medida es imposible conocerlo debido a una serie de causas de incertidumbre como son:

- *El operador o procedimiento de la medida:* esta causa incluye la falta de experiencia de la persona que está realizando la medición (manipulación inadecuada del instrumento de medida, errores en la lectura del mismo, mal posicionamiento de la pieza a la hora de realizar la medición).
- *El propio instrumento de medida:* debido a errores de alineación, desgaste del instrumento de medida, elección de un instrumento de medida inadecuado para la magnitud a medir, etc.
- *La pieza a medir:* errores de forma de la misma, deformaciones, desgaste, óxido y suciedad en la superficie a medir, etc.
- *Las condiciones ambientales:* existencia de variaciones de la temperatura durante la medición u otros agentes como polvo, humedad, presión atmosférica, etc.

Por tanto, el resultado de una medida siempre tendrá una cierta incertidumbre, que será calculada para una confianza del resultado de la medición determinada. La forma correcta de expresar el resultado de una medida es la siguiente:

$$M = m \pm u\ (k = 1{,}2{,}3)\ unidades$$

donde:

- M es el resultado de la medida de la magnitud.
- m es el valor más probable de la magnitud M (calculado como la media de todas las medidas realizadas)
- u es la incertidumbre de la medida obtenida, calculada como:

$$u = k \cdot s, \qquad siendo, s = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

- k es el factor de incertidumbre o cobertura que normalmente toma valores entre 1 y 3 según se requiera la fiabilidad de la medida (1 → 68,27%, 2 → 95,45% y 3 → 99,73%).

En general, la incertidumbre de medida engloba diversos componentes. Algunos de estos componentes pueden calcularse mediante una evaluación tipo A, a partir de la distribución estadística de los valores que proceden de las series de mediciones y pueden caracterizarse por desviaciones típicas. Las otras componentes, de tipo B, pueden ser evaluadas a partir de funciones de densidad de probabilidad basadas en la experiencia u otra información. Es decir,

la incertidumbre de tipo B, está basada en informaciones asociadas a valores publicados o reconocidos, a una certificación de calibración, etc.

En cuanto al concepto de incertidumbre, hay que tener en cuenta tres definiciones:

Incertidumbre típica de medida: incertidumbre expresada como una desviación típica.

Incertidumbre típica combinada: incertidumbre típica obtenida a partir de las incertidumbres típicas individuales asociadas a las magnitudes de entrada de un modelo de medición, es decir, cuando varias magnitudes influyen en la medición.

Incertidumbre expandida de medida*:* producto de una incertidumbre típica combinada por un factor de cobertura, k.

En cuanto a la incertidumbre típica combinada tiene principal aplicación cuando se efectúa la medida de un mesurando de forma indirecta, es decir, no se aborda la medición de la magnitud que se quiere medir, sino que se evalúan otras que están relacionadas con ésta mediante una ley física. Por ejemplo, el área se evalúa mediante la medida de varias longitudes. En estos casos, el resultado de la medida, y, se obtiene componiendo apropiadamente las incertidumbres típicas de las variables físicas influyentes $(x_1, x_2 \dots x_N)$. Esta incertidumbre típica combinada se denota como:

$$y = f[x_1, x_2 \dots x_N] \rightarrow u_c\,(y) = f[u(x_1), u(x_2) \dots u(x_N)\,]$$

Para obtener la Ley de Propagación de las Incertidumbres hay que realizar el desarrollo en serie de Taylor de primer orden en torno al valor esperado y, gracias a las propiedades de la varianza y el valor esperado, se llega a la expresión:

$$u_c{}^2(y) = \sum_{i=1}^{N} \left[\frac{\partial f}{\partial x_i}\right]^2 \cdot u^2(x_i) + 2\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=i+1}^{N} \frac{\partial f}{\partial x_i}\frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)$$

Siendo el primer término de la suma el correspondiente a magnitudes de entrada no correlacionadas y el segundo, a magnitudes de entrada correlacionadas. En este texto se tratará únicamente el caso de magnitudes de entrada no correlacionadas por lo que la incertidumbre típica combinada tendrá la siguiente expresión:

$$u_c{}^2(y) = \sum_{i=1}^{N} \left[\frac{\partial f}{\partial x_i}\right]^2 \cdot u^2(x_i) + (\text{resto incertidumbres no asociadas a las variables})^2$$

Aunque la incertidumbre típica combinada, $u_c\,(y)$, puede ser utilizada para expresar la incertidumbre de un resultado de medida, es necesario dar una medida de incertidumbre que defina, alrededor del resultado de medida, un intervalo en el interior del cual pueda esperarse encontrar gran parde de la distribución de valores que pueden ser atribuidos al mesurando. Esta incertidumbre se conoce como incertidumbre expandida, U, y se obtiene multiplicando la incertidumbre típica combinada por un factor de cobertura:

$$U = k \cdot u_c\,(y)$$

Según la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida o GUM, para una estimación de entrada obtenida por análisis estadístico de series de observaciones, la incertidumbre típica se obtiene a partir de una evaluación de Tipo A del siguiente modo:

$$u(x_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}}$$

donde $s(x_i)$ es la desviación típica y n el número de datos

En cambio, para una estimación de entrada obtenida por otros medios, la incertidumbre típica se obtiene a partir de una evaluación de tipo B de la siguiente forma dependiendo de la fuente de la que se haya obtenido la incertidumbre típica:

- *Incertidumbre debida al patrón o instrumento calibrado:* se obtiene dividiendo la incertidumbre expandida dada en el certificado de calibración por su correspondiente factor de cobertura:

$$u\,(y) = \frac{U}{k}$$

- *Incertidumbre debida a la resolución del equipo de medida:*

$$u_{res}\,(y) = \frac{\delta y}{\sqrt{12}}$$

donde δy es la resolución del dispositivo indicador.

1.2 Problemas resueltos

1.2.1 Problema 1

Se quiere determinar la medida del diámetro de un eje de diámetro nominal 25 mm en el laboratorio de metrología. Para ello se realizan 20 medidas sobre el mismo obteniendo los siguientes resultados (todas las medidas están en mm):

25,145	**25,043**	**24,998**	**24,995**
24,994	**25,059**	**25,057**	**25,012**
24,995	**25,341**	**24,889**	**25,111**
24,999	**25,210**	**25,001**	**25,001**
25,017	**25,017**	**25,174**	**25,017**

Se pide determinar el valor de la medida del diámetro del eje para una confianza del 95%.

Como se ha visto, el resultado de una medida siempre es de la forma:

$$M = m \pm u\ (k = 2)\ \text{mm}$$

Siendo en este caso k=2 ya que el nivel de confianza es del 95%.

Por tanto, hay que calcular cada uno de los términos de la expresión anterior:

$$m = \frac{\sum_1^{20} x_i}{n} = 25{,}054\ \text{mm}$$

$$u = k \cdot \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0{,}199\ \text{mm}$$

El resultado será:

$$M = 25{,}1 \pm 0{,}2\ (k = 2)\ \text{mm}$$

Nota: Siempre se redondea la medición experimental a la misma cifra decimal que la incertidumbre.

1.2.2 Problema 2

Un péndulo simple se usa para medir la aceleración de la gravedad, usando la expresión:

$$\mathbf{T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}}$$

El período medido fue de T = 1,24±0,02 (k=2) s y la longitud l = 0,381±0,002 (k=2) m. Calcular el valor resultante de la gravedad con su incertidumbre correspondiente teniendo en cuenta un nivel de confianza del 99%.

El primer paso es identificar las variables que intervienen en el problema. El objetivo es calcular la gravedad por lo que las variables intervinientes son la longitud y el periodo.

$$\mathrm{T} = 2\pi\sqrt{\frac{\mathrm{l}}{\mathrm{g}}} \rightarrow \mathrm{g} = \frac{4\pi^2\mathrm{l}}{\mathrm{T}^2} \rightarrow \mathrm{g} = \mathrm{f(l, T)}$$

El siguiente paso es calcular la incertidumbre típica de cada una de las variables:

$$T = \ 1{,}24 \pm 0{,}02 \ (\mathrm{k} = 2) \rightarrow \mathrm{T} = 1{,}24 \ \mathrm{s} \qquad u_T = \frac{0{,}02}{2} = 0{,}01$$

$$l = \ 0{,}381 \pm 0{,}002 \ (\mathrm{k} = 2) \rightarrow l = 0{,}381 \ \mathrm{m} \quad u_l = \frac{0{,}002}{2} = 0{,}001$$

Por tanto, el valor de la gravedad será:

$$\mathrm{g} = \frac{4\pi^2\mathrm{l}}{\mathrm{T}^2} \rightarrow \mathrm{g} = 9{,}7823 \ {}^{\mathrm{m}}/_{\mathrm{s}^2}$$

Aplicando la expresión de la incertidumbre típica combinada se obtiene:

$$u_c{}^2(y) = \sum_{i=1}^{N}\left[\frac{\partial f}{\partial x_i}\right]^2 \cdot u^2(x_i)$$

$$u_c{}^2 = \left(\frac{dg}{dl}\right)^2 \cdot u_l{}^2 + \left(\frac{dg}{dT}\right)^2 \cdot u_T{}^2 \rightarrow \left(\frac{4\pi^2}{T^2}\right)^2 \cdot u_l{}^2 + \left(\frac{-8\pi^2 l}{T^3}\right)^2 \cdot u_T{}^2$$

$$u_c{}^2 = 0{,}0256 \rightarrow u_c = 0{,}1599 \ {}^{\mathrm{m}}/_{\mathrm{s}^2}$$

En el enunciado indica que hay que dar la medida de la gravedad con una fiabilidad del 99% por lo que la incertidumbre típica expandida será:

$$U = k \cdot u_c \rightarrow 3 \cdot 0{,}1599 = 0{,}4796 \ {}^{\mathrm{m}}/_{\mathrm{s}^2}$$

Por tanto, la gravedad será:

$$\mathrm{g} = 9{,}78 \ \pm 0{,}48 \ (\mathrm{k} = 3) \ {}^{\mathrm{m}}/_{\mathrm{s}^2}$$

1.2.3 Problema 3

Para calibrar la rigidez de un resorte a compresión se utiliza un dispositivo donde se coloca una pesa, calibrada en laboratorio. El coeficiente de rigidez se determina dividiendo el valor del peso por la longitud comprimida, establecida por un sistema de medida de longitudes también calibrado en laboratorio.

$$\mathbf{K = \frac{m \cdot g}{x}}$$

Los datos de una calibración son los siguientes:

- $\boldsymbol{K_{teórica} = 1212\ {}^{N}/_{m}}$
- $\boldsymbol{m_{pesa} = 30,125\ \pm 0,01\ (k = 2)\ kg}$
- $\boldsymbol{g = 9,8066\ \pm 0,0040\ (k = 2)\ {}^{m}/_{s^2}}$
- **El equipo de medida longitudinal presenta una incertidumbre** $\boldsymbol{u = 0,050\ (k = 1,5)\ mm}$
- **Datos de incertidumbre asociados al montaje,** $\boldsymbol{u_{mont} = 5\ (k = 2)\ {}^{N}/_{m}}$
- **Resolución empleada en los datos de rigidez, E = 1 N/m**

Los datos de las medidas de la rigidez del resorte (en N/m) tras el ensayo son:

1216	1212	1211	1212	1211
1214	1212	1212	1219	1209

Se pide estimar la incertidumbre expandida de la rigidez del resorte a compresión del ensayo.

El primer paso es identificar las variables que intervienen en el problema. El objetivo es calcular la incertidumbre expandida de la rigidez del resorte a compresión por lo que las variables intervinientes son la masa, la longitud y la gravedad.

$$\mathrm{K = \frac{m \cdot g}{x} \rightarrow K = f(m, g, x)}$$

El siguiente paso es calcular la incertidumbre típica de cada una de las variables, diferenciando las que son de Tipo A y de Tipo B.

Cálculo de incertidumbres de Tipo A:

- $\mathrm{m_{pesa} = 30,125\ \pm 0,01\ (k = 2)\ kg \rightarrow m_{pesa} = 30,125\ kg} \qquad u_m = \frac{0,01}{2} = 0,005$
- $\mathrm{g = 9,8066\ \pm 0,0040\ (k = 2)\ {}^{m}/_{s^2} \rightarrow} \ g = 9,8066\ {}^{m}/_{s^2} \qquad u_g = \frac{0,0040}{2} = 0,002$

- $\mathrm{K} = \frac{\mathrm{m}\cdot\mathrm{g}}{\mathrm{x}} \rightarrow \mathrm{x} = \frac{\mathrm{m}\cdot\mathrm{g}}{K} = \frac{30{,}125\cdot 9{,}8066}{1212} \qquad \rightarrow x = 0{,}244\ \mathrm{m} \qquad u_x = \frac{0{,}00005}{1{,}5} = 0{,}000033$
- Tal y como indica la Guía GUM, para una estimación de entrada obtenida por análisis estadístico de series de observaciones, como es este caso, la incertidumbre típica de la variable se obtiene a partir de una evaluación de Tipo A del siguiente modo:

$$u(x_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \rightarrow u_k = \frac{s(k_i)}{\sqrt{n}} = \frac{2{,}8597}{\sqrt{10}} = 0{,}9043$$

Se aprovecha este paso para calcular el valor de la variable K como la media de todas las observaciones realizadas:

$$K = \frac{\sum_1^{10} K_i}{n} = 1212{,}8\ {}^{\mathrm{N}}/_{\mathrm{m}}$$

Cálculo de incertidumbres de Tipo B:

- $u_{mont} = \frac{5}{2} = 2{,}5$
- $u_{res} = \frac{1}{\sqrt{12}} = 0{,}2887$

Ya se tienen todos los datos para poder resolver el problema por lo que aplicamos la ley de las incertidumbres típicas combinadas:

$$u_c{}^2(y) = \sum_{i=1}^{N}\left[\frac{\partial f}{\partial x_i}\right]^2 \cdot u^2(x_i) + (resto\ incertidumbres\ no\ asociadas\ a\ las\ variables)^2$$

$$u_c{}^2 = \left(\frac{dK}{m}\right)^2 \cdot u_m{}^2 + \left(\frac{dK}{dg}\right)^2 \cdot u_g{}^2 + \left(\frac{dK}{dx}\right)^2 \cdot u_x{}^2 + u_k{}^2 + u_{mont}{}^2 + u_{res}{}^2$$

$$u_c{}^2 = \left(\frac{g}{x}\right)^2 \cdot u_m{}^2 + \left(\frac{m}{x}\right)^2 \cdot u_g{}^2 + \left(\frac{-m\cdot g}{x^2}\right)^2 \cdot u_x{}^2 + u_k{}^2 + u_{mont}{}^2 + u_{res}{}^2$$

$$u_c{}^2 = 7{,}1804 \rightarrow u_c = 2{,}6796\ {}^{\mathrm{N}}/_{\mathrm{m}}$$

En el enunciado no indica con qué fiabilidad hay que dar la medida por lo que el valor debe imponerlo el lector. En este caso, se considerará una fiabilidad del 95% por lo que el factor de cobertura será igual a 2:

$$U = k\cdot u_c \rightarrow 2\cdot 2{,}6796 = 5{,}3592\ {}^{\mathrm{N}}/_{\mathrm{m}}$$

Por tanto, la rigidez del resorte a compresión será:

$$\mathrm{K} = 1212{,}8\ \pm 5{,}4\ (\mathrm{k}=2)\ {}^{\mathrm{N}}/_{\mathrm{m}}$$

1.3 Problemas propuestos

1.3.1 Problema propuesto 1

Calcule el valor de la incertidumbre expandida de A para un nivel de fiabilidad del 99% considerando la siguiente expresión:

$$v = \sqrt{\frac{2aP}{\rho(a^2 - A^2)}}$$

Teniendo en cuenta los siguientes datos:

- $a = 450 \pm 0{,}2\ \mathrm{m}^2\ (k = 1)$
- $v = 45 \pm 0{,}25\ {}^{\mathrm{m}}/_{\mathrm{s}}\ (k = 2)$
- $P = 1{,}013 \cdot 10^5\ {}^{\mathrm{N}}/_{\mathrm{m}^2}$
- $\rho = 1000\ {}^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{m}^3}$

$$\boldsymbol{Solución}\colon\ \boldsymbol{A = 450{,}0 \pm 0{,}6\ \mathrm{m}^2\ (k = 3)}$$

1.3.2 Problema propuesto 2

Se quiere calcular el volumen de una lata de conservas de forma cilíndrica. Para ello se toman con un calibre 10 medidas del diámetro de la base (d) y 10 medidas de la altura de dicha lata (h), obteniendo los siguientes resultados:

d (mm)				
9,81	9,94	10,18	10,05	9,93
9,94	9,98	10,07	10,01	10,12
h (mm)				
17,94	18,07	17,89	17,93	18,11
17,99	18,01	18,07	17,98	18,09

Sabiendo que la resolución del calibre utilizado para ambas mediciones es de 0,01 mm, calcular el volumen de la lata de conservas expresado con su incertidumbre correspondiente.

$$\boldsymbol{Solución}\colon \boldsymbol{V = 1415{,}2 \pm 61{,}6\ \mathrm{mm}^3\ (k = 2)}$$

1.3.3 Problema propuesto 3

Se quiere determinar la resistencia eléctrica de un cierto material. Esta resistencia eléctrica se determina dividiendo el voltaje entre la intensidad de corriente, establecida por un amperímetro calibrado en laboratorio.

$$R = \frac{V}{I}$$

Los datos del ensayo son los siguientes:

$$R_{teórica} = 120\ \Omega$$

$$V = 230\ \pm 5\ \text{V}\ (k = 2)$$

El amperímetro presenta una incertidumbre $u = 0{,}005\ \text{A}\ (k = 2)$ y una resolución de 0,1 A.

La resolución del óhmetro con el que se mide la resistencia es, E = 1 Ω

Los datos de resistencia, en Ω, tras el ensayo son:

122	121	120	117	119
121	118	123	120	121

Se pide estimar la incertidumbre expandida de la resistencia del ensayo.

***Solución*: $\boldsymbol{R = 120{,}2 \pm 4{,}7\ \Omega\ (k = 2)}$**

1.3.4 Problema propuesto 4

Determinar el área de un rectángulo cuyas dimensiones principales se han determinado en el laboratorio mediante un calibre de resolución 0,01 cm obteniendo los siguientes resultados:

$$b = 120{,}23 \pm 1{,}80\ \text{cm}\ (k = 2)$$

$$h = 55{,}05 \pm 2{,}00\ \text{cm}\ (k = 2)$$

***Solución*: $\boldsymbol{A = 6618{,}7 \pm 260{,}1\ \text{cm}^2\ (k = 2)}$**

Tema 2. Criterios de rechazo de datos

2.1 Fundamento teórico

Se ha visto en apartados anteriores que cualquier medida realizada tiene una incertidumbre asociada. En ocasiones, cuando un técnico está realizando mediciones repetidas sobre alguna magnitud física, se encuentra con que hay valores que parecen estar en discordancia con el resto de medidas realizadas. En este caso, hay que decidir si se descarta o no el resultado discordante cuando a priori se ha realizado el mismo procedimiento de medida y no hay ninguna razón para desconfiar de él. Por lo general, surgen dos preguntas. ¿Realmente este es un resultado atípico? ¿Se puede eliminar este valor y continuar con el análisis de datos? En estos casos es necesario aplicar criterios de rechazo de resultados y en este texto se explicarán tres de estos criterios: Prueba de Dixon, Prueba de Grubbs y Criterio de Chauvenet.

Prueba de Dixon

Este método permite determinar un único valor atípico dentro de una serie de datos en cada iteración, es decir, esta técnica no es adecuada para la detección de múltiples valores atípicos. Esta prueba se puede realizar para series de menos de 10 datos. El procedimiento a seguir para determinar si un valor es o no atípico es el siguiente:

- Se ordena la serie de datos de forma creciente de modo que los posibles valores atípicos queden en alguno de los extremos de la serie.
- Se calcula el índice de Dixon, Q, de la siguiente forma:

$$Q_{cal} = \left| \frac{x_q - x_n}{x_h - x_l} \right|$$

siendo

x_q: posible valor atípico

x_n: valor más cercano al posible valor atípico

x_h: valor máximo de la serie de datos

x_l: valor mínimo de la serie de datos

- Comparar el valor del índice de Dixon calculado con el valor del índice tabulado para un cierto nivel de confianza (que hay que prefijar según la criticidad de los datos tomados). Los índices a comparar son los de la Tabla 2-1.
- Si el índice calculado es mayor al valor del índice tabulado, se rechaza el dato y, por tanto, se eliminaría del análisis de datos. En caso contrario se acepta el dato.

$$Si\ Q_{cal} > Q_{crit} \rightarrow \text{Se rechaza el dato}$$

- Si hay varios valores que a priori resultan atípicos, repetir el análisis para estos valores.

Tabla 2-1. Índices críticos de Dixon, Q.

N	Q_{crit} (CL: 90%)	Q_{crit} (CL: 95%)	Q_{crit} (CL: 99%)
3	0,941	0,970	0,994
4	0,765	0,829	0,926
5	0,642	0,710	0,821
6	0,560	0,625	0,740
7	0,507	0,568	0,680
8	0,468	0,526	0,634
9	0,437	0,493	0,598
10	0,412	0,466	0,568

Prueba de Grubbs

Este método, al igual que el de Dixon, permite determinar un único valor atípico dentro de una serie de datos en cada iteración, por tanto, tampoco es una técnica adecuada para la detección de múltiples valores atípicos. El procedimiento a seguir para determinar si un valor es o no atípico es el siguiente:

- Se ordena la serie de datos de forma creciente de modo que los posibles valores atípicos queden en alguno de los extremos de la serie.
- Se calcula el índice de Grubbs, T, de la siguiente forma:

$$T_{cal} = \frac{|x_i - \bar{x}|}{s}$$

Siendo,

x_i: posible valor atípico
$\bar{x}$: media de los valores de la serie de datos
s: desviación estándar de los valores de la serie de datos

- Comparar el valor del índice de Grubbs calculado con el valor del índice tabulado para un cierto nivel de confianza (que hay que prefijar según la criticidad de los datos tomados). Los índices a comparar son los de la Tabla 2-2. En el caso de no aparecer el dato en la tabla, hay que interpolar para obtener el correspondiente al número de datos de la serie.

- Si el índice calculado es mayor al valor del índice tabulado, se rechaza el dato y, por tanto, se eliminaría del análisis de datos. En caso contrario se acepta el dato.

$$Si\ T_{cal} > T_{crit} \rightarrow Se\ rechaza\ el\ dato$$

- Si hay varios valores que a priori resultan atípicos, repetir el análisis para estos valores.

Tabla 2-2. Índices críticos de Grubbs, T.

	Nivel de confianza (%)					
n	99,9	99,5	99	97,5	95	90
3	1,155	1,155	1,155	1,155	1,153	1,147
4	1,499	1,496	1,492	1,481	1,463	1,425
5	1,780	1,764	1,749	1,715	1,672	1,602
6	2,011	1,973	1,944	1,887	1,822	1,729
7	2,201	2,139	2,097	2,020	1,938	1,828
8	2,358	2,274	2,221	2,126	2,032	1,909
9	2,492	2,387	2,323	2,215	2,110	1,977
10	2,705	2,482	2,410	2,290	2,176	2,036
11	2,791	2,564	2,485	2,355	2,234	2,088
12	2,791	2,636	2,550	2,412	2,285	2,134
13	2,867	2,699	2,607	2,462	2,331	2,175
14	2,935	2,755	2,659	2,507	2,371	2,213
15	2,997	2,806	2,705	2,549	2,409	2,247
16	3,052	2,852	2,747	2,585	2,443	2,279
17	3,103	2,894	2,785	2,620	2,475	2,309
18	3,149	2,932	2,821	2,651	2,504	2,335
19	3,191	2,968	2,854	2,681	2,532	2,361
20	3,230	3,001	2,884	2,709	2,557	2,385
30	3,507	3,236	3,103	2,908	2,745	2,563
40	3,673	3,381	3,240	3,036	2,866	2,682
50	3,789	3,483	3,336	3,128	2,956	2,768
60	3,874	3,560	3,411	3,199	3,025	2,837
70	3,942	3,622	3,471	3,257	3,082	2,893
80	3,998	3,673	3,521	3,305	3,130	2,940
90	4,044	3,716	3,563	3,347	3,171	2,981
100	4,084	3,754	3,600	3,382	3,207	3,017

Criterio de Chauvenet

Este método, a diferencia de los dos anteriores, permite determinar varios valores atípicos dentro de una serie de datos en cada iteración, con una salvedad: si en una iteración hay que eliminar más de dos datos, el procedimiento de medida se considera inadecuado y habría que repetir la serie de mediciones. Este criterio es iterativo, es decir, hay que seguir aplicándolo hasta que todos los valores de la serie sean dados por válidos por el método. El procedimiento a seguir para determinar si un valor es o no atípico es el siguiente:

- Hay que realizar la siguiente comparación para cada uno de los valores de la serie:

$$|x_i - \bar{x}| > k_n \cdot s \rightarrow \text{se rechaza } x_i$$

Siendo

x_i: cada uno de los valores de la serie

$\bar{x}$: media de los valores de la serie de datos

s: desviación estándar de los valores de la serie de datos

k_n: coeficiente de Chauvenet que depende del número de datos

Tabla 2-3. Factores de Chauvenet, k_n.

n	k_n	n	k_n	n	k_n
2	1,15	8	1,86	30	2,40
3	1,35	9	1,92	40	2,48
4	1,54	10	1,96	50	2,57
5	1,65	15	2,13	100	2,81
6	1,73	20	2,24	300	3,14
7	1,80	25	2,33	500	3,29
-		-		1000	3,48

- Repetir el análisis anterior descartando los datos atípicos de forma reiterada hasta que no se descarte ningún dato.

Siempre que se tomen una serie de datos en el laboratorio, antes de proceder al análisis de los mismos, hay que aplicar sobre ellos alguno de los análisis anteriores. El técnico de medición deberá seleccionar el método que más le convenga según la tipología de los datos obtenidos.

2.2 Problemas resueltos

2.2.1 Problema 1

Se quiere determinar la medida del diámetro de un eje de diámetro nominal 25 mm en el laboratorio de metrología. Para ello se realizan 20 medidas sobre el mismo obteniendo los siguientes resultados (todas las medidas están en mm):

25,145	**25,043**	**24,998**	**24,995**
24,994	**25,059**	**25,057**	**25,012**
24,995	**25,341**	**24,889**	**25,111**
24,999	**25,210**	**25,001**	**25,001**
25,017	**25,017**	**25,174**	**25,017**

Se pide determinar si alguno de los datos tomados en el laboratorio es atípico según el criterio de rechazo que el lector considere más acertado. Dar el valor final del diámetro del eje una vez realizado el análisis de datos.

Revisando la serie de datos no se aprecia ningún valor que a priori sobresalga del resto por lo que los métodos de Dixon y Grubbs no son inicialmente apropiados. Por tanto, se utiliza el criterio de Chauvenet que realiza un estudio de todos los datos en conjunto. Para aplicar el criterio de Chauvenet es recomendable utilizar la siguiente tabla ya que facilita el método de resolución del mismo:

x_i	n	$\bar{x}$	s	$k_n\, s$	$x_i - \bar{x}$	Comparación

Recordad que las expresiones para calcular la media y la desviación son las siguientes:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} \qquad s = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Se procede a aplicar el método:

- El número de datos es 20 por lo que k_n=2,24

n	k_n	n	k_n	n	k_n
2	1,15	8	1,86	30	2,40
3	1,35	9	1,92	40	2,48
4	1,54	10	1,96	50	2,57
5	1,65	15	2,13	100	2,81
6	1,73	**20**	**2,24**	300	3,14
7	1,80	25	2,33	500	3,29
-		-		1000	3,48

- Se realiza la comparación de la primera iteración:

x_i	n	$\bar{x}$	s	$k_n\, s$	$x_i - \bar{x}$	Comparación
25,145					0,09125	OK
24,994					0,05975	OK
24,995					0,05875	OK
24,999					0,05475	OK
25,017					0,03675	OK
25,043					0,01075	OK
25,059					0,00525	OK
25,341					0,28725	Rechazar
25,210					0,15625	OK
25,017	20	25,05375	0,099532	0,22295167	0,03675	OK
24,998					0,05575	OK
25,057					0,00325	OK
24,889					0,16475	OK
25,001					0,05275	OK
25,174					0,12025	OK
24,995					0,05875	OK
25,012					0,04175	OK
25,111					0,05725	OK
25,001					0,05275	OK
25,017					0,03675	OK

Como se observa en la iteración anterior, hay que rechazar $x_i = 25{,}341\ \text{mm}$

- Se realiza una nueva iteración sin el dato anterior. En esta iteración hay 19 datos por lo que hay que calcular el K_n correspondiente mediante interpolación ya que dicho valor no aparece en la tabla:

n	k_n	n	k_n	n	k_n
2	1,15	8	1,86	30	2,40
3	1,35	9	1,92	40	2,48
4	1,54	10	1,96	50	2,57
5	1,65	**15**	**2,13**	100	2,81
6	1,73	**20**	**2,24**	300	3,14
7	1,80	25	2,33	500	3,29
-	-	-	-	1000	3,48

Interpolando:

n	k_n
15	2,13
19	x
20	2,24

$$\frac{19-15}{20-15} = \frac{Kn-2{,}13}{2.24-2{,}13} \rightarrow k_n = 2{,}218$$

x_i	n	$\bar{x}$	s	$k_n\, s$	$x_i - \bar{x}$	Comparación
25,145					0,10636842	OK
24,994					0,04463158	OK
24,995					0,04363158	OK
24,999					0,03963158	OK
25,017					0,02163158	OK
25,043					0,00436842	OK
25,059					0,02036842	OK
25,210					0,17136842	Rechazar
25,017					0,02163158	OK
24,998	19	25,0386316	0,07504459	0,16644889	0,04063158	OK
25,057					0,01836842	OK
24,889					0,14963158	OK
25,001					0,03763158	OK
25,174					0,13536842	OK
24,995					0,04363158	OK
25,012					0,02663158	OK
25,111					0,07236842	OK
25,001					0,03763158	OK
25,017					0,02163158	OK

Como se observa, hay que rechazar $x_i = 25{,}210\ \text{mm}$

Se repite el análisis hasta que todos los datos sean aceptados, quedando como datos válidos los siguientes:

24,994	**24,998**
24,995	**25,057**
24,999	**25,001**
25,017	**24,995**
25,043	**25,012**
25,059	**25,001**
25,017	**25,017**

Por tanto, el diámetro del eje tendrá una dimensión:

$$D = 25{,}01 \pm 0{,}05\ \text{mm}\ (k = 2)$$

Nota: Comparar este resultado con el del Problema 1 resuelto del apartado de Incertidumbre de la medida en el que no se ha rechazado ningún dato. En este caso, se ha disminuido bastante la incertidumbre al no tener en cuenta a priori los datos mal tomados en el laboratorio.

$$M = 25{,}1 \pm 0{,}2\ (k = 2)\ \text{mm}$$

2.2.2 Problema 2

En el laboratorio de metrología de la Universidad de Almería, los alumnos de Ingeniería Industrial están realizando un análisis para calcular el recubrimiento de pintura del manillar de una bicicleta. Para ello, utilizan un medidor de espesor de capas y toman 15 medidas sobre distintos puntos del manillar. Se pide calcular el espesor de dicho manillar estudiando previamente si los datos obtenidos son o no correctos con una fiabilidad del 95%. Aplicar el criterio de rechazo de datos que estime conveniente. Las medidas obtenidas por los alumnos son las siguientes:

Espesor de pintura (µm)		
45	47	46
44	43	55
44	45	43
25	46	47
45	45	43

El primer paso es decidir el criterio de rechazo de datos a utilizar. Estudiando los resultados se observa que dos de ellos difieren bastante del resto (25 µm y 55 µm) lo que lleva a pensar que los criterios adecuados pueden ser Dixon o Grubbs. Por tanto, como la serie de datos es de 15 (mayor de 10) se utilizará la prueba de Grubbs. Se aplica el método:

- Se ordena la serie de datos de forma creciente de modo que los posibles valores atípicos queden en alguno de los extremos de la serie:

25 43 43 43 44 44 45 45 45 45 46 46 47 47 55

- Se calcula el índice de Grubbs (T) de la siguiente forma:

$$T_{cal} = \frac{|x_i - \bar{x}|}{s}$$

Siendo

x_i: posible valor atípico (25 µm y 55 µm)

$\bar{x}$: media de los valores de la serie de datos (44,2 µm)

s: desviación estándar de los valores de la serie de datos (6,062 µm)

$$T_{25} = \frac{|25 - 44{,}2|}{6{,}062} = 3{,}167$$

$$T_{55} = \frac{|55 - 44{,}2|}{6{,}062} = 1{,}782$$

- Comparar el valor del índice de Grubbs calculado con el valor del índice tabulado para el 95% de confianza:

	Nivel de confianza (%)					
n	99,9	99,5	99	97,5	95	90
3	1,155	1,155	1,155	1,155	1,153	1,147
4	1,499	1,496	1,492	1,481	1,463	1,425
5	1,780	1,764	1,749	1,715	1,672	1,602
6	2,011	1,973	1,944	1,887	1,822	1,729
7	2,201	2,139	2,097	2,020	1,938	1,828
8	2,358	2,274	2,221	2,126	2,032	1,909
9	2,492	2,387	2,323	2,215	2,110	1,977
10	2,705	2,482	2,410	2,290	2,176	2,036
11	2,791	2,564	2,485	2,355	2,234	2,088
12	2,791	2,636	2,550	2,412	2,285	2,134
13	2,867	2,699	2,607	2,462	2,331	2,175
14	2,935	2,755	2,659	2,507	2,371	2,213
15	2,997	2,806	2,705	2,549	**2,409**	2,247
16	3,052	2,852	2,747	2,585	2,443	2,279

- Si el índice calculado es mayor al valor del índice tabulado, se rechaza el dato y, por tanto, se eliminaría del análisis de datos. En caso contrario se acepta el dato.

$$T_{25} = 3{,}167 > \ 2{,}409 \rightarrow Se\ rechaza\ el\ dato$$

$$T_{55} = 1{,}782 < \ 2{,}409 \rightarrow Se\ acepta\ el\ dato$$

Por tanto, para calcular la medida del espesor de recubrimiento únicamente habría que tener en cuenta los siguientes datos:

43 43 43 44 44 45 45 45 45 46 46 47 47 55

Calculando:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n} = 45{,}57\ \mu m$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 3{,}03\ \mu m$$

Por tanto, el valor del espesor de recubrimiento de pintura del manillar será:

$$M = 45{,}6 \pm 6{,}1\ (k = 2)\ \mu m$$

2.2.3 Problema 3

Con el sonómetro disponible en el laboratorio, se ha medido el ruido ambiental del mismo obteniéndose los siguientes valores:

Nivel de ruido (dB)		
63	**65**	**70**
45	**58**	**62**
63	**67**	**65**

Se pide utilizar la Prueba de Dixon para decidir si alguno de los datos tomados por el sonómetro es erróneo a priori para una confianza del 95%.

Como se indica en el enunciado hay que utilizar la prueba de Dixon lo que parece acertado ya que la serie de datos es menor de 10 mediciones y a priori se pueden observar los datos discordantes con la serie. Se aplica el método:

- Se ordena la serie de datos de forma creciente de modo que los posibles valores atípicos queden en alguno de los extremos de la serie:

45 58 62 63 63 65 65 67 70

- Se calcula el índice de Dixon (Q) de la siguiente forma:

$$Q_{cal} = \left|\frac{x_q - x_n}{x_h - x_l}\right|$$

Siendo

x_q: posible valor atípico

x_n: valor más cercano al posible valor atípico

x_h: valor máximo de la serie de datos

x_l: valor mínimo de la serie de datos

$$Q_{45} = \left|\frac{45 - 58}{70 - 45}\right| = 0{,}52$$

$$Q_{70} = \left|\frac{70 - 67}{70 - 45}\right| = 0{,}12$$

- Comparar el valor del índice de Dixon calculado con el valor del índice tabulado para un nivel de confianza del 95%:

N	Q_{crit} (CL: 90%)	Q_{crit} (CL: 95%)	Q_{crit} (CL: 99%)
3	0,941	0,970	0,994
4	0,765	0,829	0,926
5	0,642	0,710	0,821
6	0,560	0,625	0,740
7	0,507	0,568	0,680
8	0,468	0,526	0,634
9	0,437	**0,493**	0,598
10	0,412	0,466	0,568

- Si el índice calculado es mayor al valor del índice tabulado, se rechaza el dato y, por tanto, se eliminaría del análisis de datos. En caso contrario se acepta el dato.

$$Q_{45} = 0{,}52 > \ Q_{crit} = 0{,}493 \rightarrow Se\ rechaza\ el\ dato$$

$$Q_{70} = 0{,}12 < \ Q_{crit} = 0{,}493 \rightarrow Se\ acepta\ el\ dato$$

Por tanto, los datos válidos del ensayo de ruido serían los siguientes:

58 62 63 63 65 65 67 70

2.3 Problemas propuestos

2.3.1 Problema propuesto 1

En la medida del diámetro de un eje en un proyector de perfiles con resolución de 0,001 mm se han obtenido los 15 valores siguientes:

Diámetro del eje (mm)				
10,002	9,999	10,002	10,005	9,995
10,003	10,003	10,002	10,004	10,002
10,004	10,000	9,994	10,002	10,003

Calcular el diámetro del eje haciendo previamente un estudio de los datos utilizando el Criterio de Chauvenet. De los 15 datos, ¿cuántos se utilizan finalmente para el cálculo del diámetro?

$\boldsymbol{Solución}$: $\boldsymbol{D = 10,003 \pm 0,002\ mm\ (k = 2)}$. **Se utilizan 10 datos**

2.3.2 Problema propuesto 2

Se quiere determinar el diámetro del orificio interno una pieza utilizando un micrómetro de interiores de resolución 0,01 mm. Para ello se toman 10 mediciones. Se pide estudiar la serie de datos para decidir si todas las medidas se han realizado correctamente bajo el criterio de la prueba de Dixon para una fiabilidad del 95%. ¿Hay que rechazar alguna de las medidas realizadas?

Medidas realizadas (mm)				
23,12	21,14	22,18	25,83	21,12
22,07	22,98	21,97	22,67	21,18

$\boldsymbol{Solución}$: **Se rechaza la medida** $\boldsymbol{25,83\ mm}$

2.3.3 Problema propuesto 3

Obtener el diámetro del orificio interno del problema anterior realizando esta vez un estudio de las medidas realizadas utilizando la prueba de Grubbs. Tanto para la prueba de Grubbs como para la expresión del resultado considerar una fiabilidad del 95%. ¿Cuál es el valor de la T de Grubbs?

$\boldsymbol{Solución}$: $\boldsymbol{D = 22,05 \pm 1,56\ mm\ (k = 2)}$. $\boldsymbol{T = 2,4244}$

Tema 3. Calibración de instrumentos de medida

3.1 Fundamento teórico

Como se ha indicado en la Introducción, la calibración es un proceso que consiste en evaluar la capacidad de un instrumento de medida para determinar una magnitud conocida (patrón). Por tanto, calibrar es comprobar si el instrumento da valores próximos al valor verdadero de una magnitud. El proceso de calibración comprende la medición del patrón cuyo valor se quiere determinar por comparación con un patrón de referencia, comprobar si el valor obtenido está dentro de los límites establecidos para la función a realizar, y en caso de estar fuera de los límites, efectuar el correspondiente ajuste o calibración del equipo de medición.

Cada vez que se utiliza un instrumento de medida se produce un desajuste del mismo por lo que es necesario realizar calibraciones periódicas que permitan asegurar que los instrumentos siguen proporcionando valores correctos.

Como es de imaginar, no es posible realizar una calibración en todos los puntos del campo de medida de un determinado instrumento si no que se realiza la calibración de determinados puntos dentro del mismo pudiéndose establecer una corrección global de calibración a partir de la media de las correcciones de calibración en cada punto de estudio. Normalmente lo que se realiza es obtener la corrección de calibración para cada uno de los puntos de estudio y la mayor de ellas será la que se aplique al instrumento de medida de modo que siempre se esté en el lado más desfavorable.

Cada instrumento calibrado obtiene un certificado de calibración que garantiza la exactitud y trazabilidad. El certificado de calibración de un instrumento deberá indicar los puntos del campo de medida calibrados, la incertidumbre del patrón o instrumento empleado en cada punto de calibración, la corrección de calibración obtenida en cada uno de ellos, el número de reiteraciones efectuadas en cada punto de calibración y su dispersión, y la incertidumbre asociada a la corrección de cada punto de calibración, para un factor de incertidumbre que también se indicará. Cada uno de estos instrumentos deberá tener visible una etiqueta de calibración, que indica si el mismo puede utilizarse, tiene limitaciones en su uso o si están fuera de servicio.

Antes de comenzar a explicar el proceso de calibración paso a paso conviene saber qué es un patrón y los tipos de patrones que existen. Se entiende por patrón a cualquier representación física de una unidad de medida. Según el grado de precisión se clasifican en:

Patrón internacional: es el patrón reconocido por un acuerdo internacional para servir como referencia internacional para la asignación de valores a otros patrones de la magnitud considerada. La Conferencia General de Pesas y Medidas es el organismo que reconoce los patrones internacionales que se encuentran depositados en la Oficina Internacional de Pesos y Medidas (BIPM, por sus siglas en francés, Bureau International des Poids et Mesure). Estos patrones materializan una unidad de medida por propia definición con la mayor exactitud que permite la tecnología de producción y medición existente.

Patrón nacional: son aquellos que permiten establecer la cadena metrológica de un país. Sirven como referencia para la asignación de valores a otros patrones de la magnitud considerada. Estos patrones se conservan en el Instituto Nacional de Metrología que es la máxima autoridad metrológica de un país. En España, este organismo es el CEM, Centro Español de Metrología. Estos patrones también son conocidos como *patrones primarios*. En el CEM también se encuentran los *patrones de calibración* que se emplean para dar trazabilidad a los patrones de los laboratorios de la red de calibración.

Patrón de referencia o secundario: son los patrones básicos de referencia que se utilizan en los laboratorios industriales de medición. Estos patrones se conservan en la industria en cuestión y se verifica su trazabilidad con los patrones primarios o patrones de calibración disponibles en el CEM.

Patrón de trabajo: estos patrones se calibran con los patrones de referencia y son empleados en la calibración de los instrumentos y equipos de uso en talleres y plantas de fabricación.

En este tema se expondrá el proceso de calibración de un equipo de medida utilizando *bloques patrón longitudinales* (BPL). Este tipo de bloques patrón tienen forma de paralelepípedo rectangular en el que dos de sus caras paralelas presentan un finísimo pulido especular que asegura excepcional paralelismo y planitud, pudiendo materializar una longitud determinada con elevada precisión a la temperatura de 20°C. Los bloques patrón están construidos generalmente en acero, pero también se presentan en otros materiales de mayor dureza y resistencia, como el carburo de tungsteno o cromo y la cerámica, por lo que el empleo de piezas de uno u otro material dependerá del presupuesto y la aplicación

Los bloques patrón, como instrumentos de calibración que son, deben cumplir unos requisitos que los hagan aptos para cumplir adecuadamente su función. Estos requisitos deben ser:

- *Exactitud geométrica y dimensional:* deben cumplir con las exigencias de longitud, paralelismo y planitud.
- *Capacidad de adherencia a otros bloques patrón:* determinada por su acabado superficial.
- *Estabilidad dimensional a través del tiempo*: deben mantener invariable su dimensión nominal. Deben ser resistentes al desgaste y la corrosión,
- *Coeficiente de expansión térmica cercano a los metales comunes:* esto minimiza los errores de medición frente a variaciones de temperatura.

La particularidad más importante de los BPL es que pueden agruparse por superposición para formar cualquier tipo de medida de modo que la longitud total del grupo formado por diferentes bloques patrón queda dentro de los límites de precisión requeridos para su empleo como patrón. Para esto es muy necesaria la calidad superficial y la capacidad de adherencia de los mismos.

Los juegos de bloques patrón se suministran en estuches de madera y deben estar siempre protegidos de la oxidación. Para suministrarles esta protección se les aplica una capa de vaselina neutra y para utilizarlos se limpian con éter dietílico. Para evitar su deterioro hay que tener en cuenta una serie de consideraciones como evitar dejarlos en atmósferas sucias y húmedas (el lugar del laboratorio destinado a calibración debe tener una atmósfera controlada con temperatura a 20°C), se le debe aplicar antes de almacenarlos la fina capa de vaselina protectora, hay que manipularlos con suma delicadeza evitando golpearlos y rayarlos y hay que evitar en lo posible su manipulación directa con las manos.

Procedimiento de calibración de un instrumento de medida

1. Describir el elemento a calibrar, es decir, indicar el tipo de instrumento de medida, su campo de medida y su apreciación.

2. Definir los puntos de calibración a lo largo del campo de medida del instrumento. Estos puntos de calibración se conocen como dimensiones nominales.

3. Seleccionar para cada uno de los puntos de calibración, de entre los BPL de calibración disponibles, los que se vayan a utilizar para obtener la dimensión deseada anotando también la incertidumbre de cada uno de ellos. Para agilizar los tiempos de medida en el laboratorio, es recomendable elegir los puntos de calibración de modo que no haya que utilizarse el mismo bloque patrón para dos puntos diferentes. En el Anexo I se adjuntan los datos correspondientes a la certificación del juego de BPL disponible en el Laboratorio de Metrología de la Universidad de Almería. Este juego está formado por 88 bloques patrón de la clase 2 fabricados por TESA.

4. Preparar los BPL seleccionados. Para ello hay que limpiarlos adecuadamente y adherirlos entre sí dejándolos sobre una mesa de trabajo limpia para que se estabilicen térmicamente. El laboratorio tiene que tener una atmósfera controlada en la que la temperatura de trabajo sea de 20°C. Toda manipulación de los BPL debe realizarse con guantes para evitar manchas de grasa en los mismos y posteriores oxidaciones.

5. A partir de las dimensiones certificadas para cada uno de los BPL seleccionados, Lc, se calculan las distancias reales de calibración, Xpi y las incertidumbres típicas combinadas asociadas a cada una de ellas, u_{pi}. Para obtener la distancia real total, hay que sumar las distancias reales individuales de cada uno de los BPL considerados en un determinado punto de calibración. Para obtener la incertidumbre típica combinada de un conjunto de BPL se utiliza la siguiente expresión:

$$u_{pi} = k_i \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \left(\frac{u_{xj}}{k_j}\right)^2}$$

   donde:

   u_{pi}: es la incertidumbre típica combinada asociada a un determinado punto de calibración.

   u_{xj}: es cada una de las incertidumbres típicas de los BPL utilizados en ese punto de calibración

6. Una vez que los BPL seleccionados y adheridos hayan alcanzado la estabilidad térmica se realiza la medida de cada uno de los puntos de calibración con el instrumento de medida a calibrar teniendo precaución al manipular los BPL y el instrumento de medida para que no se altere sustancialmente el equilibrio térmico. Cómo mínimo, hay que realizar la medida de cada punto de calibración 10 veces.

7. Se limpiarán y almacenarán correctamente los BPL en su maletín correspondiente.

8. A partir de las mediciones obtenidas con el instrumento de medida a calibrar se calcula su valor medio, Xpi, y la desviación típica muestral, Sci, para cada uno de los puntos de calibración considerados.

9. Realizar la corrección de calibración, Cci, en cada uno de los puntos de calibración. Estos puntos de calibración se calculan restando la dimensión real de cada uno de los puntos de calibración, Xpi, menos el valor medio medido para cada punto, Xci.

$$Cci = Xpi - Xci = Dimensión\ real\ BPL - Valor\ medio\ medido$$

10. Finalmente, hay que dar un valor a la incertidumbre de las medidas a realizar por el instrumento de medida calibrado. Se calcula la incertidumbre expandida para cada uno de los puntos de calibración y, la incertidumbre final del instrumento de medida será la mayor de las incertidumbres de los puntos de calibración redondeada a un número entero en las unidades de apreciación del instrumento. La incertidumbre expandida para cada punto de calibración se calcula de la siguiente forma:

$$U_i = k \cdot \sqrt{\left(\frac{u_{pi}}{k_i}\right)^2 + Sci^2\left(\frac{1}{n_c} + \frac{1}{n}\right) + \frac{Cci^2}{9}}$$

donde:

U_i: incertidumbre expandida del instrumento calibrado en cada punto de calibración.

k: Factor de cobertura entre 1 y 3.

u_{pi}: incertidumbre combinada de los BPL para cada punto de calibración.

Sci: desviación típica para cada uno de los puntos de calibración considerados.

n_c: número de medidas realizadas en cada punto de calibración.

n: número de iteraciones supuestas en el uso normal del instrumento.

Cci: corrección de calibración para cada punto de calibración.

11. En la ficha de calibración del instrumento debe aparecer:

    a. El tipo de instrumento de medida.

    b. El número de serie del instrumento de medida.

    c. La fecha de calibración.

    d. La incertidumbre del instrumento de medida y el factor de cobertura empleado para su cálculo.

3.2 Problemas resueltos

3.2.1 Problema 1

Al Laboratorio del Calibración de la UAL ha llegado un micrómetro analógico de exteriores con número de serie 123456, campo de medida de 0 a 25 mm y apreciación 1 µm. Se pide a los técnicos de laboratorio que calibren el mismo y emitan la etiqueta final de calibración.

Se realizará al completo el proceso de calibración del micrómetro siguiendo los pasos indicados en el punto anterior.

1. Describir el elemento a calibrar:
    a. Tipo de instrumento: Micrómetro de exteriores
    b. Número de serie: 123456
    c. Campo de medida: 0-25 mm
    d. Apreciación: 1 µm
2. Definir los puntos de calibración: en este caso se van a elegir 5 puntos de calibración (este número lo elige el técnico de calibración) de modo que se abarque todo el campo de medida del dispositivo.

Punto calibración (i)	Dimensión nominal x_i (mm)
1	0,000
2	4,440
3	12,480
4	17,520
5	23,450

3. Seleccionar para cada uno de los puntos de calibración, de entre los BPL de calibración disponibles, los que se vayan a utilizar para obtener la dimensión deseada anotando también la incertidumbre de cada uno de ellos.

Punto calibración (i)	Dimensión nominal x_i (mm)	Dimensión nominal de los patrones seleccionados L (mm)	Incertidumbre asociada al bloque patrón u_{xj} k=2 (µm)
1	--	--	--
2	4,440	3,000 1,440	0,05 0,05
3	12,480	8,500 2,500 1,480	0,12 0,06 0,09
4	17,520	10,000 5,000 1,500 1,020	0,06 0,07 0,07 0,03
5	23,450	20,000 2,000 1,450	0,09 0,02 0,05

4. Preparar los BPL seleccionados. Para ello hay que limpiarlos adecuadamente y adherirlos entre sí dejándolos sobre una mesa de trabajo limpia para que se estabilicen térmicamente. El laboratorio tiene que tener una atmósfera controlada en la que la temperatura de trabajo sea de 20°C. Toda manipulación de los BPL debe realizarse con guantes para evitar manchas de grasa en los mismos y posteriores oxidaciones.

5. A partir de las dimensiones certificadas para cada uno de los BPL seleccionados (Lc) se calculan las distancias reales de calibración (Xpi) y las incertidumbres típicas combinadas asociadas a cada una de ellas (u_{pi}).

Punto calibración (i)	Dimensión nominal x_i (mm)	Dimensión nominal de los patrones seleccionados L (mm)	Dimensión real de los patrones seleccionados Lc (mm)	Dimensión real de cada punto de calibración Xpi (mm)	Incertidumbre asociada al bloque patrón u_{xj} k=2 (µm)	Incertidumbre asociada al punto de calibración u_{pi} k=2 (µm)
1	--	--	--	--	--	--
2	4,440	3,000 1,440	2,99980 1,43977	4,43957	0,05 0,05	0,07071
3	12,480	8,500 2,500 1,480	8,50021 2,50022 1,48021	12,48064	0,12 0,06 0,09	0,16155
4	17,520	10,000 5,000 1,500 1,020	9,99965 5,00006 1,49970 1,02010	17,51951	0,06 0,07 0,07 0,03	0,11958
5	23,450	20,000 2,000 1,450	20,00010 1,99985 1,45022	23,45017	0,09 0,02 0,05	0,10488

Ejemplo de cálculo de u_{pi}:

$$u_{p3} = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{0{,}12}{2}\right)^2 + \left(\frac{0{,}06}{2}\right)^2 + \left(\frac{0{,}09}{2}\right)^2} = 0{,}16155$$

6. Una vez que los BPL seleccionados y adheridos hayan alcanzado la estabilidad térmica se realiza la medida de cada uno de los puntos de calibración con el instrumento de medida a calibrar. Las medidas obtenidas en el laboratorio han sido las siguientes:

Punto calibración (i)	1	2	3	4	5
x_i (mm)	0,000	4,440	12,480	17,520	23,450
Medida marcada por el instrumento a calibrar entre los centros de las caras de los BPL adheridos (mm)	0,002	4,440	12,480	17,521	23,449
	0,000	4,438	12,481	17,521	23,451
	0,000	4,439	12,479	17,522	23,450
	0,001	4,440	12,479	17,522	23,450
	0,001	4,440	12,482	17,520	23,450
	0,000	4,440	12,481	17,521	23,451
	0,000	4,441	12,481	17,519	23,449
	0,001	4,441	12,480	17,521	23,451
	0,001	4,440	12,481	17,521	23,450
	0,000	4,440	12,479	17,521	23,450

7. Se limpiarán y almacenarán correctamente los BPL en su maletín correspondiente.

8. En este paso se van a reagrupar los pasos 8 y 9 para reflejar la información en la misma tabla. A partir de las mediciones obtenidas con el instrumento de medida a calibrar se calcula su valor medio (Xci) y la desviación típica muestral (Sci) para cada uno de los puntos de calibración considerados. Además, se realizará la corrección de calibración para cada punto de calibración.

$$Cci = Xpi - Xci = Dimensión\ real\ BPL - Valor\ medio\ medido$$

Punto calibración (i)	1	2	3	4	5
x_i (mm)	0,000	4,440	12,480	17,520	23,450
Medida marcada por el instrumento a calibrar entre los centros de las caras de los BPL adheridos (mm)	0,002	4,440	12,480	17,521	23,449
	0,000	4,438	12,481	17,521	23,451
	0,000	4,439	12,479	17,522	23,450
	0,001	4,440	12,479	17,522	23,450
	0,001	4,440	12,482	17,520	23,450
	0,000	4,440	12,481	17,521	23,451
	0,000	4,441	12,481	17,519	23,449
	0,001	4,441	12,480	17,521	23,451
	0,001	4,440	12,481	17,521	23,450
	0,000	4,440	12,479	17,521	23,450
Xci (mm)	0,001	4,440	12,480	17,521	23,450
Sci (µm)	0,6992	0,8756	1,0593	0,8756	0,7379
Cci (µm)	-0,60	-0,33	0,34	-1,39	0,07

10. Se calcula la incertidumbre expandida para cada uno de los puntos de calibración y, la incertidumbre final del instrumento de medida será la mayor de las incertidumbres de los puntos de calibración redondeada a un número entero en las unidades de apreciación del instrumento.

$$U_i = k \cdot \sqrt{\left(\frac{u_{pi}}{k_i}\right)^2 + Sci^2\left(\frac{1}{n_c} + \frac{1}{n}\right) + \frac{Cci^2}{9}}$$

$$U_1 = 2 \cdot \sqrt{0^2 + 0{,}6992^2\left(\frac{1}{10} + \frac{1}{1}\right) + \frac{(-0{,}60)^2}{9}} = 1{,}52\ \mu m$$

$$U_2 = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{0{,}07071}{2}\right)^2 + 0{,}8756^2\left(\frac{1}{10} + \frac{1}{1}\right) + \frac{(-0{,}33)^2}{9}} = 1{,}85\ \mu m$$

$$U_3 = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{0{,}16155}{2}\right)^2 + 1{,}0593^2\left(\frac{1}{10} + \frac{1}{1}\right) + \frac{(0{,}34)^2}{9}} = \mathbf{2{,}24\ \mu m}$$

$$U_4 = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{0{,}11958}{2}\right)^2 + 0{,}8756^2\left(\frac{1}{10} + \frac{1}{1}\right) + \frac{(-1{,}39)^2}{9}} = 2{,}06\ \mu m$$

$$U_5 = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{0{,}10488}{2}\right)^2 + 0{,}7379^2\left(\frac{1}{10} + \frac{1}{1}\right) + \frac{(0{,}07)^2}{9}} = 1{,}55\ \mu m$$

11. Se elabora la ficha de calibración del instrumento:

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN UAL		
INSTRUMENTO	Micrómetro analógico de exteriores	INCERTIDUMBRE k=2 3 µm
Nº SERIE	123456	
FECHA DE CALIBRACIÓN	DIC-2018	

3.3 Problemas propuestos

3.3.1 Problema propuesto 1

Al Laboratorio del Calibración de la UAL ha llegado un calibre digital con número de serie 123456, campo de medida de 0 a 150 mm y apreciación 0,1 mm para proceder a su calibración. Para calibrarlo, se han seleccionado los siguientes puntos de calibración y, una vez, estabilizados los bloques patrón en el laboratorio se han realizado 10 medidas sobre cada punto de calibración obteniendo los siguientes resultados:

Punto calibración (i)	1	2	3	4	5	6
x_i (mm)	0,0	31,5	72,5	96,1	121,2	147,5
Medida marcada por el instrumento a calibrar entre los centros de las caras de los BPL adheridos (mm)	0,0	31,4	72,3	96,0	121,2	147,5
	0,0	31,5	72,4	96,1	121,2	147,5
	0,1	31,4	72,4	96,0	121,2	147,6
	0,0	31,5	72,3	96,0	121,3	147,6
	0,1	31,5	72,5	96,0	121,3	147,5
	0,1	31,4	72,4	96,1	121,2	147,5
	0,0	31,4	72,3	96,1	121,1	147,6
	0,0	31,5	72,5	96,1	121,2	147,6
	0,1	31,5	72,5	96,1	121,1	147,6
	0,0	31,5	72,5	96,1	121,1	147,6

Se pide obtener la etiqueta final de calibración de dicho instrumento de medida.

Solución:

LABORATORIO DE CALIBRACIÓN UAL		
INSTRUMENTO	Calibre digital	INCERTIDUMBRE k=2 0,2 mm
Nº SERIE	123456	
FECHA DE CALIBRACIÓN	DIC-2018	

Tema 4. Tolerancias dimensionales

4.1 Fundamento teórico

Las desviaciones en las dimensiones de una pieza fabricada, respecto de las cotas indicadas en los planos, dependerá del proceso de fabricación elegido, siendo normalmente más costoso aquel método que permite un mejor control y precisión en las piezas terminadas. En cualquier caso, por precisa que sea la máquina-herramienta, siempre se deberá contar con unos márgenes dimensionales en la fabricación, ya que no es posible fabricar una pieza con su medida exacta ni garantizar que todas las piezas fabricadas sean exactamente iguales.

Sin embargo, para garantizar la correcta funcionalidad e intercambiabilidad de las piezas fabricadas es necesario establecer unos límites admisibles para dimensiones de las piezas, de forma que puedan desempeñar correctamente la labor para la que han sido fabricadas. La definición de estos márgenes, su amplitud y posición, dependerá de la aplicación concreta de cada pieza y más concretamente de las necesidades establecidas para cada una de sus dimensiones. Así, requerirán una mayor precisión las cotas que hacen referencia a los diámetros de dos piezas que han de ensamblar una dentro de la otra, como puede ser el caso de un eje y el cubo de un engranaje o una polea, que la superficie libre de una pieza que no hace contacto con ningún otro elemento.

A la variación máxima admisible de una medida se le denomina **tolerancia**. Esta tolerancia debe especificarse en los planos de fabricación y debe elegirse lo más amplia posible para reducir tiempos y costes de fabricación, pero dentro de los límites máximos que permiten que las piezas puedan desempeñar correctamente su función.

Estas desviaciones pueden afectar, además de a las dimensiones de la pieza (longitudes y ángulos), a la forma (rectas, círculos, planos, etc.), a la orientación (perpendicularidad, paralelismo, concentricidad, etc.) y a la rugosidad o calidad de sus superficies. Así se puede establecer la siguiente clasificación de las tolerancias:

- Tolerancias macrogeométricas.
    - Dimensionales.
    - Geométricas.
        - De forma.
        - De posición.
        - De orientación.
- Tolerancia microgeométricas (rugosidad superficial).

En este tema se abordarán únicamente las **tolerancias dimensionales** y los tipos de **ajustes** resultantes del ensamblaje entre dos piezas con definición de tolerancias. Dependiendo de las tolerancias de ambas piezas, el ajuste resultante podrá ser con juego, con apriete o indeterminado, como se verá más adelante.

Normalización

Debido a la necesidad de establecer un sistema formalizado de tolerancias y ajustes, se han ido establecido diversas normas en el ámbito industrial, a nivel nacional y a nivel internacional. Actualmente, las normas internacionalmente aceptadas en lo relativo a las tolerancias y ajustes son:

UNE-EN ISO 286-1:2011. Especificaciones geométricas de producto (GPS). Sistema de codificación ISO para las tolerancias en dimensiones lineales. Parte 1: Base de desviaciones, tolerancias y ajustes. (esta norma sustituye a la UNE-EN 20286-1:1996)

UNE-EN ISO 286-2:2011. Especificaciones geométricas de producto (GPS). Sistema de codificación ISO para las tolerancias en dimensiones lineales. Parte 2: Tablas de las clases de tolerancias normalizadas y de las desviaciones límite para ejes y agujeros. (esta norma sustituye a la UNE-EN 20286-2:1996)

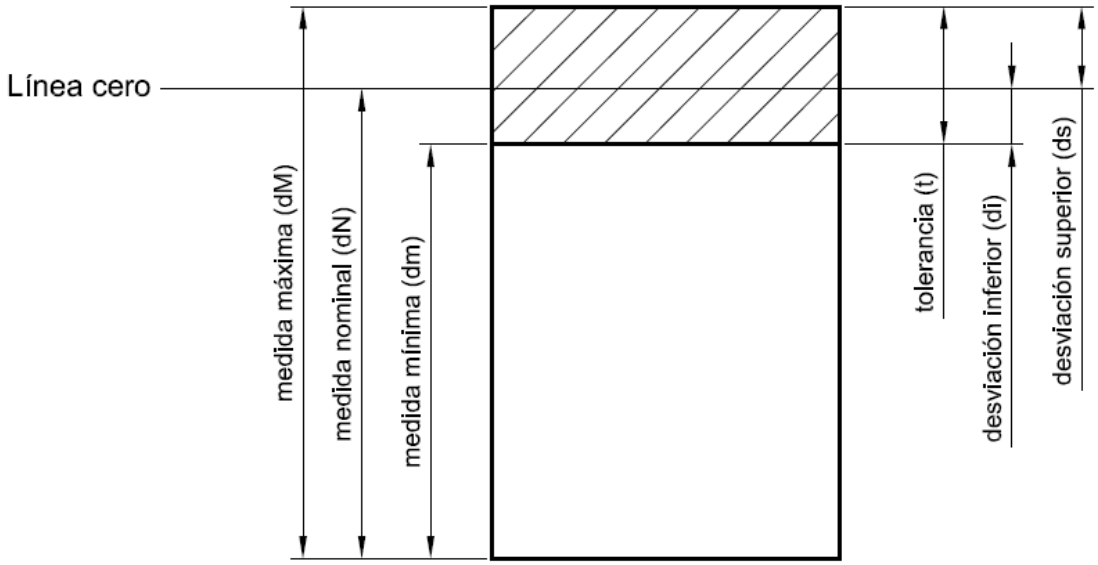
Términos y definiciones

A continuación, se definen algunos términos relacionados con las tolerancias dimensionales:

Eje: término utilizado por acuerdo para designar todo elemento exterior de una pieza, sea o no cilíndrica.

Agujero: término utilizado por acuerdo para designar todo elemento interior de una pieza, sea o no cilíndrica.

Por convenio, todas las notaciones referentes a los ejes se hacen con letras minúsculas y las de los agujeros con letras mayúsculas.



Medida o dimensión: nombre que expresa en la "unidad elegida" el valor numérico de una longitud. La medida se llama **cota** cuando está inscrita sobre el dibujo.

Medida efectiva (de, De): medida de un elemento obtenida por medición.

Medida nominal (dN, DN): medida con referencia a la cual son definidas las medidas límites obtenidas por aplicación de las desviaciones superior e inferior.

Medidas límites: las dos medidas extremas admisibles de un elemento entre las cuales debe encontrarse la medida efectiva.

Medida máxima (dM, DM): la máxima medida admisible de un elemento.

Medida mínima (dm, Dm): la mínima medida admisible de un elemento.

Línea cero (O): línea recta que representa la medida nominal a partir de la cual son representadas las desviaciones.

Desviación superior (ds, Ds): diferencia algebraica entre la medida máxima y la medida nominal correspondiente.

Desviación inferior (di, Di): diferencia algebraica entre la medida mínima y la medida nominal correspondiente.

Desviación fundamental: una cualquiera de las desviaciones límites (superior o inferior) que define la posición de la zona de tolerancia. Por acuerdo se toma la que está más cerca de la línea cero.

Tolerancia dimensional (t, T): diferencia entre la medida máxima y la medida mínima; coincide con la diferencia entre la desviación superior y la desviación inferior. La tolerancia se considera en valor absoluto.

Tolerancia fundamental, IT: en el sistema de tolerancias y ajuste ISO, una cualquiera de las tolerancias del sistema. (IT: Tolerancia Internacional)

Grado de tolerancia (calidad): conjunto de tolerancias consideradas como correspondientes a un mismo grado de precisión para todas las medidas nominales (por ejemplo, IT7).

Zona de tolerancia: en una representación gráfica, zona que abarca el valor de tolerancia.

Unidad de tolerancia, i: en el sistema de tolerancias y ajuste ISO, unidad, función de la medida nominal que sirve para determinar las tolerancias fundamentales. Valor numérico calculado en función de la medida de cálculo.

Grupos dimensionales

La norma establece divisiones para las dimensiones entre 0 y 3150 mm. El objeto de estas divisiones es simplificar los cálculos y reducir el número de tolerancias posibles. Estas divisiones se denominan grupos dimensionales.

Los grupos dimensionales para medidas entre 0 y 500 mm se recogen en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1. Grupos de dimensiones nominales (dN, DN), en mm.

Serie principal		Serie complementaria	
mayor de (D_1)	hasta (D_2)	mayor de	hasta
0	3	0	3
3	6	3	6
10	18	10 14	14 18
18	30	18 24	24 30
30	50	30 40	40 50
50	80	50 65	65 80
80	120	80 100	100 120
120	180	120 140 160	140 160 180
180	250	180 200 225	200 225 250
250	315	250 280	280 315
315	400	315 355	355 400
400	500	400 450	450 500

Calidad de la tolerancia

La calidad hace referencia a la amplitud de la tolerancia. Para una dimensión dada, a menor amplitud de la tolerancia mayor calidad. Además, la calidad está relacionada con la dimensión de la pieza; a mayor grupo de diámetros, la amplitud de la zona de tolerancia será mayor para una misma calidad.

La calidad está normalizada, y se establecen 20 calidades de tolerancia o grados de tolerancia, designados por las siglas IT01, IT0, IT1, IT2, IT3, ..., IT 18, representativas de la calidad de la tolerancia, desde la más “fina” hasta la más “basta”, cuyos valores numéricos están calculados para cada grupo de diámetros nominales, constituyendo las tolerancias fundamentales del sistema. Un menor índice numérico del grado de tolerancia indica una mayor calidad.

La amplitud de la zona de tolerancia (que por razones de fabricación ha de ser la mayor posible), varía según la utilización o servicio de la pieza fabricada, a cuyo efecto están establecidas las 20 calidades o series de tolerancias fundamentales aplicables a una misma dimensión o medida.

En la siguiente Tabla 4-2 se recogen los valores de tolerancia para cada grupo de diámetros y nivel de calidad, se observa cómo para una determinada medida nominal (grupo

dimensional), la magnitud de la tolerancia aumenta al hacerlo también el índice de tolerancia, es decir, disminuye la precisión. A su vez, para un determinado índice de tolerancia, la magnitud de la tolerancia aumenta al hacerlo también la medida nominal.

Tabla 4-2. Valores numéricos de las tolerancias fundamentales.

Grupos de diámetros (mm)	Calidades																		
	IT 01	IT 0	IT 1	IT 2	IT 3	IT 4	IT 5	IT 6	IT 7	IT 8	IT 9	IT 10	IT 11	IT 12	IT 13	IT 14	IT 15	IT 16	IT 17	IT 18
	µm													mm						
≤ 3	0.3	0.5	0.8	1.2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	0,1	0,14	0,25	0,4	0,6	1	1,4
> 3 a 6	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	5	8	12	18	30	48	75	0,12	0,18	0,3	0,48	0,75	1,2	1,8
> 6 a 10	0.4	0.6	1	1.5	2.5	4	6	9	15	22	36	58	90	0,15	0,22	0,36	0,58	0,9	1,5	2,2
> 10 a 18	0.5	0.8	1.2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	0,18	0,27	0,43	0,7	1,1	1,6	2,7
> 18 a 30	0.6	1	1.5	2.5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	0,21	0,33	0,52	0,84	1,3	2,1	3,3
> 30 a 50	0.6	1	1.5	2.5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	0,25	0,39	0,62	1	1,6	2,5	3,9
> 50 a 80	0.8	1.2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	0,3	0,46	0,74	1,2	1,9	3	4,6
> 80 a 120	1	1.5	2.5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	0,35	0,54	0,87	1,4	2,2	3,5	5,4
> 120 a 180	1.2	2	3.5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	0,4	0,63	1	1,6	2,5	4	6,3
> 180 a 250	2	3	4.5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	0,46	0,72	1,15	1,85	2,9	4,6	7,2
> 250 a 315	2.5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	0,52	0,81	1,3	2,1	3,2	5,2	8,1
> 315 a 400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	0,57	0,89	1,4	2,3	3,6	5,7	8,9
> 400 a 500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	0,63	0,97	1,55	2,5	4	6,3	8,7

La elección de la calidad dependerá de la aplicación:

- Calidades IT01 e IT0: Especial precisión. Patrones de medida.
- Calidades IT1 a IT3 para ejes y calidades IT1 a IT4 para agujeros: calibres y piezas de alta precisión.
- Calidades IT4 a IT11 para ejes y calidades IT5 a IT11 para agujeros: parejas de piezas que han de ajustar al ser ensambladas.
- Calidades IT12 a IT18: piezas o elementos aislados y que no requieren, por tanto, de una exactitud dimensional tan precisa.

Cálculo de la tolerancia

Según se ha indicado, el valor de la tolerancia fundamental es calculada para cada grupo de diámetros y para cada calidad. El valor numérico en cada caso es obtenido a partir de la *unidad de tolerancia*.

Para las calidades IT5 a IT18, la unidad de tolerancia, i, se calcula según,

$$i = 0{,}45\ \sqrt[3]{D} + 0{,}001\ D$$

donde, D es el diámetro de cálculo, el cual es la media geométrica de las medidas nominales extremas (D_1 y D_2) del grupo de diámetros considerado.

$$D = \sqrt{D_1 \cdot D_2}$$

Los valores de las series de tolerancias fundamentales son múltiplos de la unidad de tolerancia. Se aplica un factor distinto en función del índice de calidad.

IT5	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT5	IT16	IT17	IT18
7 i	10 i	16 i	25 i	40 i	64 i	100 i	160 i	250 i	400 i	640 i	1000 i	1600 i	2500 i

Para las calidades IT01 a IT4 se emplean las siguientes fórmulas:

$$\text{IT01} = 0{,}3 + 0{,}008\ D$$

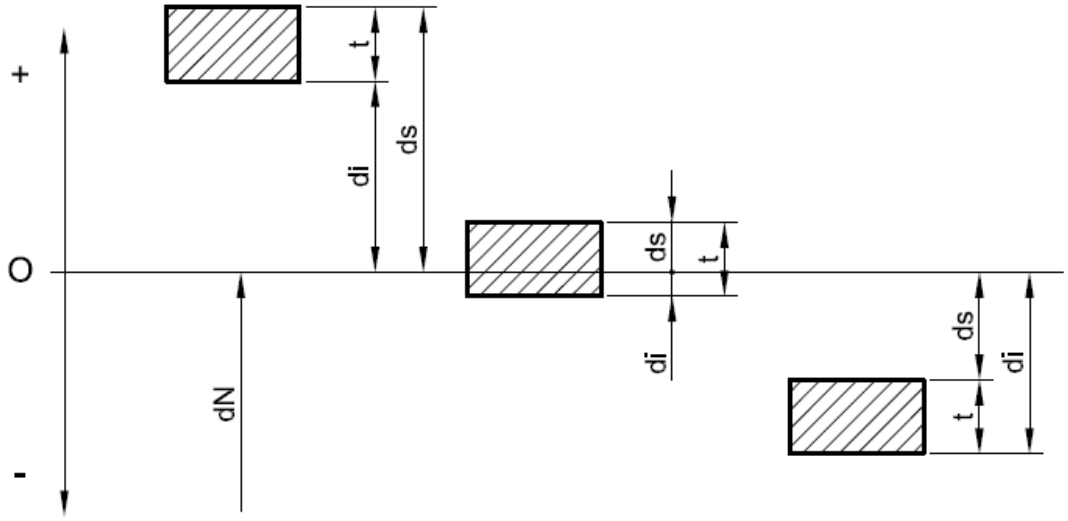
$$\text{IT0} = 0{,}5 + 0{,}012\ D$$

$$\text{ITn} = 1{,}6^{n-1} \cdot (0{,}8 + 0{,}020\ D), \qquad \text{para } 1 \leq n \leq 4$$

Si bien se ha indicado el procedimiento de cálculo del valor de la tolerancia, lo usual será hacer uso de la tabla de tolerancias fundamentales, donde se recogen los valores ya calculados.

Posición de la zona de tolerancia

Por necesidades funcionales de la pieza, la zona de tolerancia, esto es, la zona donde debe encontrarse la dimensión efectiva de la pieza, no ha de contener necesariamente a la dimensión nominal. La zona de tolerancia puede situarse por encima de la línea cero, por debajo, o conteniendo a dicha línea.



El sistema ISO de tolerancias está estructurado en 28 posiciones diferentes para las zonas de tolerancias, establecidas respecto de línea cero y designadas por una o varias letras mayúsculas para los agujeros (A…….ZC) y por una o varias letras minúsculas para los ejes (a……..zc).

Clase de tolerancia: término que cuantifica el conjunto de una desviación fundamental y de una calidad de tolerancia, por ejemplo, H7, n5, etc. Dónde, la letra (o letras) representan la desviación fundamental y el número el grado de tolerancia normalizado.

Medida con tolerancia: está designada por la medida nominal seguida del símbolo de la clase de tolerancia o de las desviaciones indicadas explícitamente. Ejemplos: 35H7, 80g6.

La Figura 4-1 es una representación esquemática de la posición de las desviaciones fundamentales.

Cuando la zona de tolerancia queda por encima de la línea cero (zona positiva) su posición queda definida por la desviación inferior (posiciones **A** a **H** para agujeros y posiciones **k** a **zc** para ejes). Cuando la zona de tolerancia queda por debajo de la línea cero (zona negativa) su posición queda definida por la desviación superior (posiciones **a** a **h** para ejes y posiciones **K** a **ZC** para agujeros).

En la posición **h** para ejes la desviación superior es nula, coincidiendo la medida máxima de la zona de tolerancia con la medida nominal.

En la posición **H** para agujeros la desviación inferior es nula, coincidiendo la medida mínima de la zona de tolerancia con la medida nominal.

Para poder satisfacer las necesidades corrientes de ajustes se ha previsto para cada grupo dimensional, toda una gama de desviaciones que definen la posición de las tolerancias con respecto a la línea cero.

La posición de cada una de estas zonas de tolerancia es diferente para cada uno de grupos de dimensionales y se definen con respecto a la línea de referencia cero. Su valor se ha determina mediante fórmula empírica (ver UNE-EN ISO 286-1:2011).

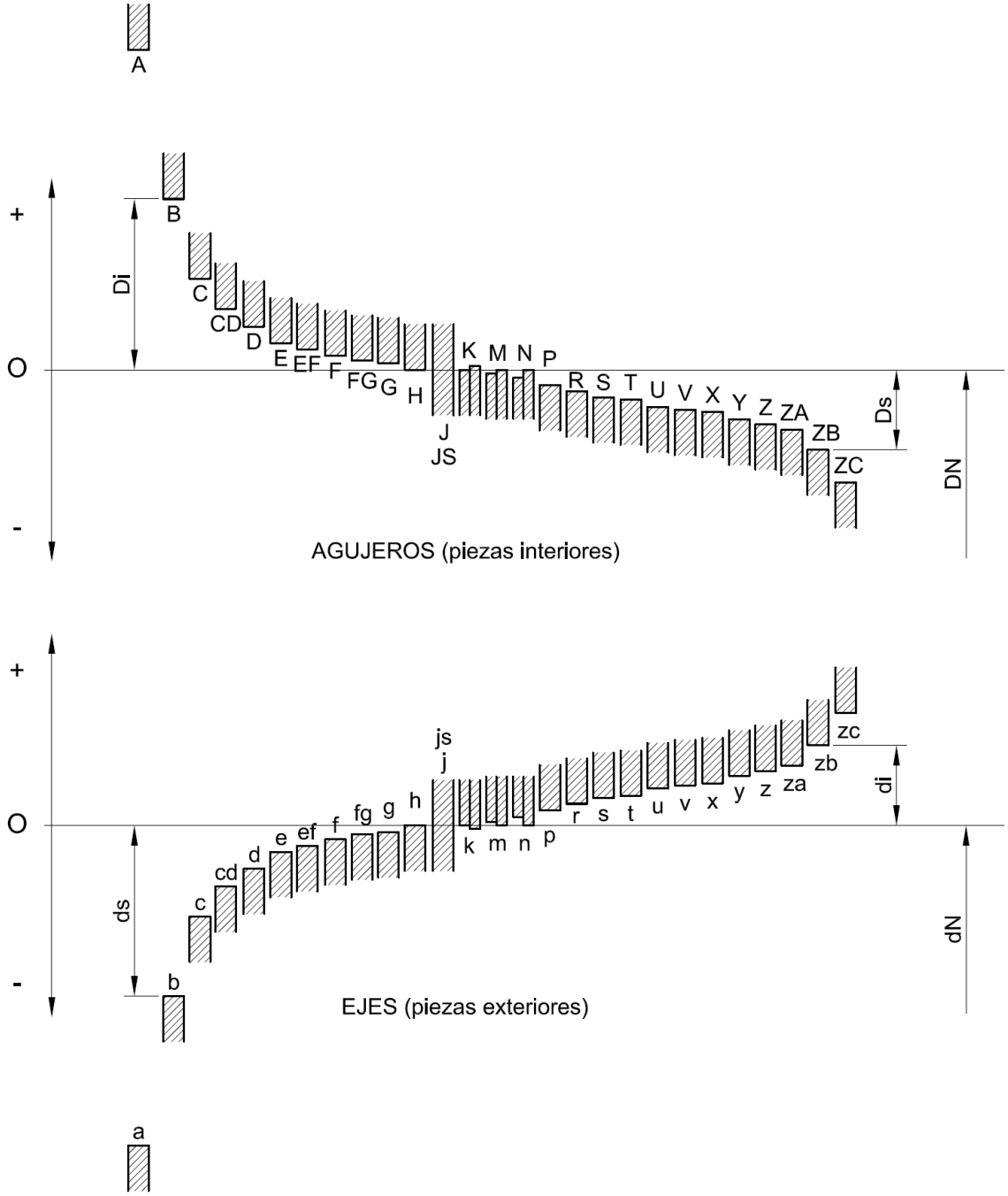


Figura 4-1. Esquema de las distintas posiciones de la zona de tolerancia para agujeros y ejes.

Zonas de tolerancia preferentes

Dado que tenemos 28 posiciones para la zona de tolerancia y cada una de las tolerancias puede tener distintos valores (según el diámetro nominal y la calidad deseada) se tienen finalmente una gran cantidad de posibilidades. Para reducir el número de utensilios y calibres

de verificación, así como para unificar y simplificar la gama de posibilidades, se recomienda utilizar únicamente algunas zonas de tolerancia, las llamadas zonas de tolerancia preferentes.

Zonas de tolerancia preferentes

					g5	h5	js5	k5	m5	n5	p5	r5	s5	t5	
				f6	**g6**	**h6**	**js6**	**k6**	m6	**n6**	**p6**	**r6**	**s6**	t6	
			e7	**f7**		**h7**	js7	k7	m7	n7	p7	r7	s7	t7	u7
		d8	**e8**	f8		h8									
		d9	e9			**h9**									
		d10													
a11	**b11**	**c11**				**h11**									

					G6	H6	JS6	K6	M6	N6	P6	R6	S6	T6	
				F7	**G7**	**H7**	**JS7**	**K7**	M7	**N7**	**P7**	**R7**	**S7**	T7	
			E8	**F8**		**H8**	JS8	K8	M8	N8	P8	R8			
		D9	**E9**	F9		**H9**									
		D10	E10			H10									
A11	**B11**	**C11**	D11			**H11**									

Tolerancias dimensionales sin indicación individual de tolerancia

El sistema ISO de tolerancias y ajustes descrito anteriormente es necesario en medidas funcionales, críticas o de responsabilidad, indicándose la clase de tolerancia junto a cada cota en la que sea necesaria en el plano. Para el resto de medidas, de menor responsabilidad, se debe cumplir con la norma EN-22768-1:1993, parte 1: Tolerancias para dimensiones lineales y angulares sin indicación individual de tolerancia. Esta norma recoge únicamente cuatro clases de tolerancias: fina (f), media (m), grosera (c) y muy grosera (v), y establece las desviaciones admisibles respecto al valor nominal según ocho grupos de dimensiones. Esta norma establece tolerancias para dimensiones lineales, dimensiones angulares. En el cajetín del plano deberá indicarse la norma de aplicación seguida del grado de calidad elegido (f, m, c, v), por ejemplo, EN-22768-m.

Desviaciones fundamentales para ejes (µm)

Desviación fundamental	Desviación superior (ds)											
Posición	**a**	**b**	**c**	**cd**	**d**	**e**	**ef**	**f**	**fg**	**g**	**h**	**js**
Calidad	Todas las calidades											
d ≤ 3	−270	−140	−60	−34	−20	−14	−10	−6	−4	−2	0	Para la posición js, di = − IT/2 y ds = IT/2
3 < d ≤ 6	−270	−140	−70	−46	−30	−20	−14	−10	−6	−4	0	
6 < d ≤ 10	−280	−150	−80	−56	−40	−25	−18	−13	−8	−5	0	
10 < d ≤ 14	−290	−150	−95		−50	−32		−16		−6	0	
14 < d ≤ 18												
18 < d ≤ 24	−300	−160	−110		−65	−40		−20		−7	0	
24 < d ≤ 30												
30 < d ≤ 40	−310	−170	−120		−80	−50		−25		−9	0	
40 < d ≤ 50	−320	−180	−130									
50 < d ≤ 65	−340	−190	−140		−100	−60		−30		−10	0	
65 < d ≤ 80	−360	−200	−150									
80 < d ≤ 100	−380	−220	−170		−120	−72		−36		−12	0	
100 < d ≤ 120	−410	−240	−180									
120 < d ≤ 140	−460	−260	−200		−145	−85		-43		-14	0	
140 < d ≤ 160	−520	−280	−210									
160 < d ≤ 180	−580	−310	−230									
180 < d ≤ 200	−660	−340	−240		−170	−100		-50		-15	0	
200 < d ≤ 225	−740	−380	−260									
225 < d ≤ 250	−820	−420	−280									
250 < d ≤ 280	−920	−460	−300		−190	−110		-56		-17	0	
280 < d ≤ 315	−1050	−540	−330									
315 < d ≤ 355	−1200	−600	−360		−210	−125		−62		−18	0	
355 < d ≤ 400	−1350	−680	−400									
400 < d ≤ 450	1500	−760	−440		−230	−135		−68		-20	0	
450 < d≤ 500	1650	−840	−480									

Desviación inferior (di)																		
j			**k**		**m**	**n**	**p**	**r**	**s**	**t**	**u**	**v**	**x**	**y**	**z**	**za**	**zb**	**zc**
IT5 IT6	IT7	IT8	4≤IT≤7	IT<4 IT>7	Todas las calidades													
−2	−4	−6	0	0	+2	+4	+6	+10	+14		+18		+20		+26	+32	+40	+60
−2	−4		+1	0	+4	+8	+12	+15	+19		+23		+28		+35	+42	+50	+80
−2	−5		+1	0	+6	+10	+15	+19	+23		+28		+34		+42	+52	+67	+97
−3	−6		+1	0	+7	+12	+18	+23	+28		+33		+40		+50	+64	+90	+130
												+39	+45		+60	+77	+108	+150
−4	−8		+2	0	+8	+15	+22	+28	+35		+41	+47	+54	+63	+73	+98	+136	+188
										+41	+48	+55	+64	+75	+88	+118	+160	+218
−5	−10		+2	0	+9	+17	+26	+34	+43	+48	+60	+68	+80	+94	+112	+148	+200	+274
										+54	+70	+81	+97	+114	+136	+180	+242	+325
−7	−12		+2	0	+11	+20	+32	+41	+53	+66	+87	+102	+122	+144	+172	+226	+300	+405
								+43	+59	+75	+102	+120	+146	+174	+210	+274	+360	+480
−9	−15		+3	0	+13	+23	+37	+51	+71	+91	+124	+146	+178	+214	+258	+335	+445	+585
								+54	+79	+104	+144	+172	+210	+254	+310	+400	+525	+690
−11	−18		+3	0	+15	+27	+43	+63	+92	+122	+170	+202	+248	+300	+365	+470	+620	+800
								+65	+100	+134	+190	+228	+280	+340	+415	+535	+700	+900
								+68	+108	+146	+210	+252	+310	+380	+465	+600	+780	+1000
−13	−21		+4	0	+17	+31	+50	+77	+122	+166	+236	+284	+350	+425	+520	+670	+880	+1150
								+80	+130	+180	+258	+310	+385	+470	+575	+740	+960	+1250
								+84	+140	+196	+284	+340	+425	+520	+640	+820	+1050	+1350
−16	−26		+4	0	+20	+34	+56	+94	+158	+218	+315	+385	+475	+580	+710	+920	+1200	+1550
								+98	+170	+240	+350	+425	+525	+650	+790	+1000	+1300	+1700
−18	−28		+4	0	+21	+37	+62	+108	+190	+268	+390	+475	+590	+730	+900	+1150	+1500	+1900
								+114	+208	+294	+435	+530	+660	+820	+1000	+1300	+1650	+2100
−20	−32		+5	0	+23	+40	+68	+126	+232	+330	+490	+595	+740	+920	+1100	+1450	+1850	+2400
								+132	+252	+360	+540	+660	+820	+1000	+1250	+1600	+2100	+2600

Desviaciones fundamentales para agujeros (µm)

Desviación fundamental	Desviación inferior (Di)												Desviación superior (Ds)																VALORES DE **Δ**					
Posición	A	B	C	CD	D	E	EF	F	FG	G	H	JS	J			K		M		N		P a ZC	P	R	S	T	U	V	X	Y	Z	ZA	ZB	ZC	Grados de tolerancia					
Calidad	Todas las calidades												IT6	IT7	IT8	IT≤8	IT>8	IT≤8	IT>8	IT≤8	IT>8	IT≤8	GRADOS DE TOLERANCIA SUPERIORES A IT7												IT3	IT4	IT5	IT6	IT7	IT8
d ≤ 3	270	140	60	34	20	14	10	6	4	2	0	DESVIACIÓN = ±(ITn)/2, donde n es el valor de IT	2	4	6	0	0	-2	-2	-4+Δ	-4	Valores como en los grados de tolerancia superiores a IT7 incrementados en **Δ**	-6	-10	-14		-18		-20		-26	-32	-40	-60	0	0	0	0	0	0
3 < d ≤ 6	270	140	70	46	30	20	14	10	6	4	0		5	6	10	-1+Δ		-4+Δ	-4	-8+Δ	0		-12	-15	-19		-23		-28		-35	-42	-50	-80	1	1,5	1	3	4	6
6 < d ≤ 10	280	150	80	56	40	25	18	13	8	5	0		5	8	12	-1+Δ		-6+Δ	-6	-10+Δ	0		-15	-19	-23		-28		-34		-42	-52	-67	-97	1	1,5	2	3	6	7
10 < d ≤ 14	290	150	95		50	32		16		6	0		6	10	15	-1+Δ		-7+Δ	-7	-12+Δ	0		-18	-23	-28		-33		-40		-50	-64	-90	-130	1	2	3	3	7	9
14 < d ≤ 18																												-39	-45		-60	-77	-108	-150	1	2	3	3	7	9
18 < d ≤ 24	300	160	110		65	40		20		7	0		8	12	20	-2+Δ		-8+Δ	-8	-15+Δ	0		-22	-28	-35		-41	-47	-54	-63	-73	-98	-136	-188	1,5	2	3	4	8	12
24 < d ≤ 30																										-41	-48	-55	-64	-75	-88	-118	-160	-218	1,5	2	3	4	8	12
30 < d ≤ 40	310	170	120		80	50		25		9	0		10	14	24	-2+Δ		-9+Δ	-9	-17+Δ	0		-26	-34	-43	-48	-60	-68	-80	-94	-112	-148	-200	-274	1,5	3	4	5	9	14
40 < d ≤ 50	320	180	130																							-54	-70	-81	-97	-114	-136	-180	-242	-325	1,5	3	4	5	9	14
50 < d ≤ 65	340	190	140		100	60		30		10	0		13	18	28	-2+Δ		-11+Δ	-11	-20+Δ	0		-32	-41	-53	-66	-87	-102	-122	-144	-172	-226	-300	-405	2	3	5	6	11	16
65 < d ≤ 80	360	200	150																					-43	-59	-75	-102	-120	-146	-174	-210	-274	-360	-490	2	3	5	6	11	16
80 < d ≤ 100	380	220	170		120	72		36		12	0		16	22	34	-3+Δ		-13+Δ	-13	-23+Δ	0		-37	-51	-71	-91	-124	-146	-178	-214	-258	-335	-445	-585	2	4	5	7	13	19
100 < d ≤ 120	410	240	180																					-54	-79	-104	-144	-172	-210	-254	-310	-400	-525	-690	2	4	5	7	13	19
120 < d ≤ 140	460	260	200		145	85		43		14	0		18	26	41	-3+Δ		-15+Δ	-15	-27+Δ	0		-43	-63	-92	-122	-170	-202	-248	-300	-365	-470	-620	-800	3	4	6	7	15	23
140 < d ≤ 160	520	280	210																					-65	-100	-134	-190	-228	-280	-340	-415	-535	-700	-900	3	4	6	7	15	23
160 < d ≤ 180	580	310	230																					-68	-108	-146	-210	-252	-310	-380	-465	-600	-780	-1000	3	4	6	7	15	23
180 < d ≤ 200	660	340	240		170	100		50		15	0		22	30	47	-4+Δ		-17+Δ	-17	-31+Δ	0		-50	-77	-122	-166	-236	-284	-340	-425	-520	-670	-880	-1150	3	4	6	9	17	26
200 < d ≤ 225	740	380	260																					-80	-130	-180	-258	-310	-385	-470	-575	-740	-960	-1250	3	4	6	9	17	26
225 < d ≤ 250	820	420	280																					-84	-140	-196	-284	-340	-425	-520	-640	-820	-1050	-1350	3	4	6	9	17	26
250 < d ≤ 280	920	480	300		190	110		56		17	0		25	36	55	-4+Δ		-20+Δ	-20	-34+Δ	0		-56	-94	-158	-218	-315	-385	-475	-580	-710	-920	-1200	-1550	4	4	7	9	20	29
280 < d ≤ 315	1050	540	330																					-98	-170	-240	-350	-425	-525	-650	-790	-1000	-1300	-1700	4	4	7	9	20	29
315 < d ≤ 355	1200	600	360		210	125		62		18	0		29	39	60	-4+Δ		-21+Δ	-21	-37+Δ	0		-62	-108	-190	-268	-390	-475	-590	-730	-900	-1150	-1500	-1900	4	5	7	11	21	32
355 < d ≤ 400	1350	680	400																					-114	-208	-294	-435	-530	-660	-820	-1000	-1300	-1650	-2100	4	5	7	11	21	32
400 < d ≤ 450	1500	760	440		230	135		68		20	0		33	43	66	-5+Δ		-23+Δ	-23	-40+Δ	0		-68	-126	-232	-330	-490	-595	-740	-920	-1100	-1450	-1850	-2400	5	5	7	13	23	34
450 < d≤ 500	1650	840	480																					-132	-252	-360	-540	-660	-820	-1000	-1250	-1600	-2100	-2600	5	5	7	13	23	34

4.2 Problemas resueltos

4.2.1 Problema 1

Determinar la tolerancia para una medida de valor nominal 26 mm y calidad IT8.

El valor de la medida nominal se encuentra dentro del grupo de diámetros de 18 mm a 30 mm. Para calcular el valor de la unidad de tolerancia es necesario obtener el diámetro de cálculo D, el cual es la media geométrica de los valores extremos del grupo de diámetros.

$$D = \sqrt{D_1 \cdot D_2} = \sqrt{18 \cdot 30} = 23{,}240 \text{ mm}$$

La unidad de tolerancia se calcula según:

$$i = 0{,}45 \sqrt[3]{D} + 0{,}001\, D = 1{,}307\ \mu\text{m}$$

Finalmente, el producto de la unidad de tolerancia por el factor correspondiente a la calidad IT8 da como resultado la tolerancia.

IT5	IT6	IT7	**IT8**	IT9	IT10	IT11	IT12	IT13	IT14	IT5	IT16	IT17	IT18
7 i	10 i	16 i	**25 i**	40 i	64 i	100 i	160 i	250 i	400 i	640 i	1000 i	1600 i	2500 i

Tolerancia = 25 i = 32,675 μm $\approx 33\ \mu$m

4.2.2 Problema 2

Determinar las tolerancias para una medida de valor nominal 45 mm y calidades IT8, IT9, IT10 e IT11.

El valor de la medida nominal se encuentra dentro del grupo de diámetros de 30 mm a 50 mm. Por tanto, el diámetro de cálculo D será:

$$D = \sqrt{D_1 \cdot D_2} = \sqrt{30 \cdot 50} = 38{,}730 \text{ mm}$$

La unidad de tolerancia se calcula según:

$$i = 0{,}45 \sqrt[3]{D} + 0{,}001\, D = 1{,}561\ \mu\text{m}$$

Multiplicando el valor de la unidad de tolerancia por el factor correspondiente a cada calidad, se obtiene la tolerancia dimensional en cada caso.

(IT8) Tolerancia = 25 i = 39,031 μm $\approx 39\ \mu$m

(IT9) Tolerancia = 40 i = 62,450 μm $\approx 62\ \mu$m

(IT10) Tolerancia = 64 i = 99,920 μm $\approx$ 100 μm

(IT11) Tolerancia = 100 i = 156,12 μm $\approx$ 160 μm

Compruébese que estos valores coinciden con los valores indicados en la tabla de tolerancias fundamentales.

4.2.3 Problema 3

Determinar las medidas límite de un eje con medida 65p6.

Pertenece al grupo de dimensiones de valores mayores de 50 a 80 mm.

La tolerancia dimensional para ese grupo de diámetros y calidad IT6 es t = 19 µm.

De la tabla de desviaciones fundamentales, para la posición **p**, la desviación inferior es

di = 32 µm

La desviación inferior se calcula a partir de la desviación inferior di y de la tolerancia t.

ds = di + t = 51 µm

La medidas límite, son:

Medida máxima, dM = dN + ds = 65,051 µm

Medida mínima, dm = dN + di = 65,032 µm

4.2.4 Problema 4

Determinar las medidas límite de un agujero con medida 150N5.

Pertenece al grupo de dimensiones de valores mayores de 120 a 180 mm.

La tolerancia dimensional para ese grupo de diámetros y calidad IT5 es T = 18 µm.

De la tabla de desviaciones fundamentales, para la posición N, la desviación superior es

Ds = -27 µm + Δ

con Δ = 6 para calidad IT4. Por tanto, Ds = -21 µm.

La desviación inferior se calcula a partir de la desviación superior Ds y de la tolerancia T.

Di = Ds – T = -39 µm

La medidas límite, son:

Medida máxima, DM = DN + Ds = 149,979 µm

Medida mínima, Dm = DN + Di = 149,961 µm

4.2.5 Problema 5

Se desea determinar la tolerancia normalizada para un eje de medida nominal 250 mm en la que, por requisitos de funcionamiento, la medida máxima debe ser inferior o igual a 250,100 mm y la medida mínima debe ser superior o igual a 250,020 mm.

Es necesario determinar la tolerancia normalizada a partir de los datos del problema. Esto es, obtener la calidad y la posición de la zona de tolerancia.

La diferencia entre los valores máximos admisibles indica el valor máximo que puede tomar la calidad de la tolerancia.

$$250{,}100 - 250{,}020 \text{ mm} = 0{,}080 \text{ mm} > t$$

Para el grupo de dimensiones de entre 180 a 250 mm, buscamos la calidad cuya tolerancia sea inferior a 80 µm pero lo más próxima posible. En este caso, corresponde con la calidad IT8 con una tolerancia,

$$t = 72 \text{ µm}$$

Ahora buscamos una posición de la zona de tolerancia de manera que se los requisitos de medida máxima y mínima. Nos encontramos por encima de la medida nominal, por lo tanto, la deviación fundamental será la desviación inferior.

Medida mínima, $dm = dN + di \geq 250{,}020$ µm → $di \geq 0{,}020$ µm

Medida máxima, $dM = dN + ds = dN + di + t \leq 250{,}100$ µm → $di \leq 0{,}028$ µm

De la tabla de desviaciones fundamentales, se puede comprobar que no existe ninguna posición cuya desviación inferior se encuentre entre 20 y 28 µm, por lo tanto, se deberá optar por una calidad mayor (a costa de un mayor coste de fabricación).

Probamos con la calidad IT7, que indica una tolerancia,

$$t = 46 \text{ µm}$$

En este caso, los límites para la desviación inferior son:

Medida mínima, $dm = dN + di \geq 250{,}020$ µm → $di \geq 0{,}020$ µm

Medida máxima, $dM = dN + ds = dN + di + t \leq 250{,}100$ µm → $di \leq 0{,}054$ µm

Existen dos posiciones que cumplen con estos límites:

Posición **n** → di = 31 µm

Posición **p** → di = 50 µm

Se escogerá la posición **n** por quedar más centrada dentro de los límites obtenidos.

La medida con tolerancia obtenida es **250n7**. Las medidas límite, son:

ds = di + t = 77 µm

Medida máxima, DM = DN + Ds = 250,077 µm

Medida mínima, Dm = DN + Di = 250,031 µm

4.3 Problemas propuestos

4.3.1 Problema propuesto 1

Determinar las medidas límite de los ejes con medida 35g8 y 5js6, y para los agujeros 60E9, 140R7 y 700H9.

Solución:

Eje o agujero	35g8	5js6	60E9	140R7	700H9
Medida máxima (mm)	38,950	5,004	60,134	139,937	700,200
Media mínima (mm)	28,911	4,996	60,060	138,897	700,000

4.3.2 Problema propuesto 2

Se desea determinar la tolerancia normalizada para un agujero de medida nominal 84 mm en la que, por requisitos de funcionamiento, la medida máxima debe ser inferior o igual a 83,950 mm y la medida mínima debe ser superior o igual a 82,840 mm.

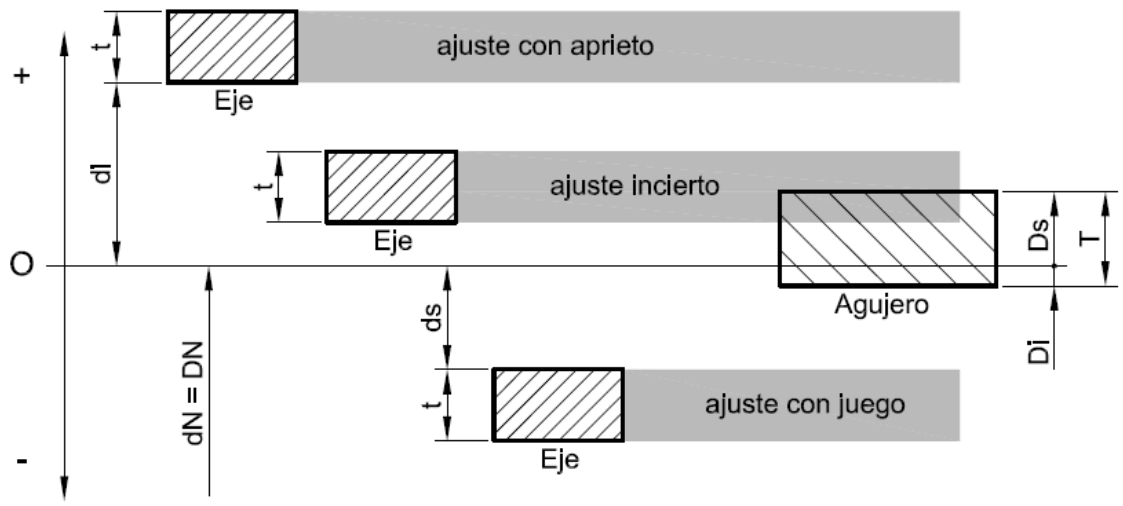
Solución: **son posibles dos tolerancias, 84R9 y 84S9**

Tema 5. Ajustes

5.1 Fundamento teórico

En el diseño de máquinas es habitual que ciertos elementos deban ensamblar o encajar dentro de otros. La forma en la que ambos elementos deben encajar dependerá de la función para la que han sido diseñados. Así, el ajuste entre la cabeza de un tornillo y la boca de la llave que se emplea para apretarlo debe tener cierto **juego** o holgura para facilitar la tarea del operario. Por el contrario, el ajuste entre el aro exterior de un rodamiento y su alojamiento suele realizarse con un cierto **aprieto** para evitar que se desplace de su posición durante el funcionamiento.

En la fase de diseño, el ingeniero debe seleccionar la amplitud y posición de las zonas de tolerancia del eje y agujero para conseguir el tipo de ajuste deseado. En la siguiente figura se muestra los tres tipos de ajuste posibles en función de la posición relativa entre las zonas de tolerancia del eje y agujero.



Ajuste con juego: ajuste que asegura siempre un juego entre el agujero y el eje después del ensamblaje, es decir, un ajuste en el que la medida máxima del agujero es superior o igual a la medida del eje.

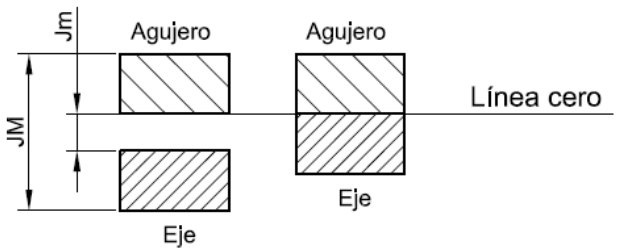
Ajuste con aprieto: ajuste que asegura siempre un aprieto entre el agujero y el eje después del ensamblaje, es decir, un ajuste en el que la medida máxima del agujero es inferior o igual a la medida del eje.

Ajuste incierto: ajuste en el que se puede obtener tanto un juego como un aprieto después del ensamblaje en función de las medidas efectivas del eje y agujero. Es decir, cuando las zonas de tolerancia de eje y agujero se solapan.

El **ajuste** se define como diferencia entre las medidas antes del montaje de dos piezas que han de ensamblar. Se hace referencia a las medidas antes del montaje ya que las dimensiones de las piezas se pueden ver modificadas después del ensamblaje. Esto ocurrirá en el caso de los ajustes con aprieto, en los que el diámetro del eje es mayor que el del agujero. Lógicamente, una vez ensamblados, ambos elementos se habrán visto deformados y tendrán el mismo diámetro.

Ajuste con juego

Juego: diferencia entre las medidas, antes de ensamblar, del agujero y del eje, cuando esta diferencia es positiva, es decir, cuando el diámetro del eje es inferior al diámetro del agujero.



Juego mínimo (Jm): en un ajuste con juego, diferencia positiva entre la medida mínima del agujero (Dm) y la medida máxima del eje (dM).

$$Jm = Dm - dM$$

Juego máximo (JM): en un ajuste con juego, diferencia positiva entre la medida máxima del agujero (DM) y la medida mínima del eje (dm).

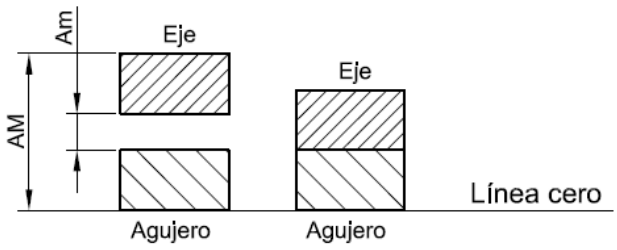
$$JM = DM - dm$$

Tolerancia del juego (TJ): diferencia entre los juegos máximo y mínimo. Coincide con la suma de las tolerancias de los dos elementos (eje y agujero) del ajuste.

$$TJ = JM – Jm = T + t$$

Ajuste con aprieto

Aprieto: valor absoluto de la diferencia entre las medidas, antes de ensamblar, del agujero y del eje, cuando esta diferencia es negativa, es decir, cuando el diámetro del eje es superior al diámetro del agujero.



Aprieto mínimo (Am): en un ajuste con aprieto, diferencia positiva, antes de ensamblar, entre la medida mínima del eje (dm) y la medida máxima del agujero (DM).

$$Am = Dm - dM$$

Aprieto máximo (AM): en un ajuste con aprieto, diferencia positiva, antes de ensamblar, entre la medida máxima del eje (dM) y la medida mínima del agujero (Dm).

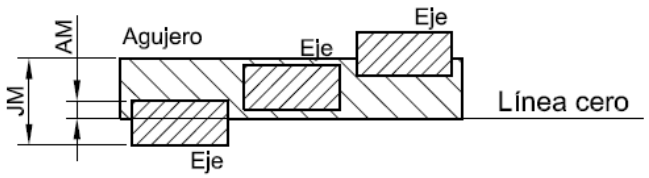
$$AM = dM - Dm$$

Tolerancia del aprieto (TA): diferencia entre los aprietos máximo y mínimo. Coincide con la suma de las tolerancias de los dos elementos (eje y agujero) del ajuste.

$$TA = AM – Am = T + t$$

Ajuste incierto o indeterminado

Aprieto: valor absoluto de la diferencia entre las medidas, antes de ensamblar, del agujero y del eje, cuando esta diferencia es negativa, es decir, cuando el diámetro del eje es superior al diámetro del agujero.



En un ajuste incierto se definen el juego máximo y el apriete máximo que se pueden obtener. Su definición coincide con las anteriores.

Juego máximo (JM): en un ajuste con aprieto, diferencia positiva entre la medida máxima del agujero (DM) y la medida mínima del eje (dm).

$$JM = DM - dm$$

Aprieto máximo (AM): en un ajuste incierto, diferencia positiva, antes de ensamblar, entre la medida máxima del eje (dM) y la medida mínima del agujero (Dm).

$$AM = dM - Dm$$

Tolerancia del ajuste incierto (TI): suma del juego máximo y del aprieto máximo. Coincide con la suma de las tolerancias de los dos elementos (eje y agujero) del ajuste.

$$TI = JM + AM = T + t$$

Designación del ajuste

El ajuste entre dos elementos a ensamblar debe quedar designada por la medida nominal (común a eje y agujero), la clase de tolerancia del agujero y seguida de la clase de tolerancia del eje.

Ejemplos:

30H7/g6

120E9/h9

Sistemas de ajustes

Un sistema de ajuste es un conjunto sistemático de ajustes entre ejes y agujeros, de forma que la combinación entre las zonas de tolerancia de ambos elementos pueda lugar a los distintos tipos de ajustes (con juego, con aprieto e incierto).

La norma establece los sistemas de ajustes: sistema de ajuste de eje único y sistema de ajuste de agujero único.

En el **sistema de ajustes de eje único**, los diferentes juegos o aprietos requeridos son obtenidos por combinación del **eje** con zona de tolerancia en la **posición h** con distintas posiciones de tolerancia del agujero.

Ejemplos:

40J7/h6

120D10/h9

70F8/h6

En el **sistema de ajustes de agujero único**, los diferentes juegos o aprietos requeridos son obtenidos por combinación del **agujero** con zona de tolerancia en la **posición H** con distintas posiciones de tolerancia del eje.

Ejemplos:

52H8/e8

45H7/j6

Elección del ajuste

En la elección del ajuste, se recomienda tener en cuenta que:

- Se debe evitar el exceso de precisión. Se deberá elegir el mayor índice de calidad (mayor amplitud de tolerancia) que cumpla con los requisitos de diseño establecidos.

- Se elegirá preferiblemente uno de los dos sistemas de ajuste: eje base o agujero único. Entre estos dos, normalmente se prefiere el sistema de agujero único, ya que en taller es más fácil modificar las tolerancias del eje.

- Se adoptará para el agujero una tolerancia igual o mayor que la del eje. Con una diferencia máxima de dos índices de calidad. Ejemplos: H7/f7 (igual calidad), H7/j6 (diferencia de uno), H11/d9 (diferencia de dos).

- Dentro de las combinaciones de calidad posibles, se elegirá aquella que dé más tolerancia al ajuste.

- En los ajustes la permuta entre las letras que designan las posiciones de eje y agujero da como resultado el mismo ajuste. De esta forma, el ajuste H7/j6 es equivalente al ajuste J7/h6.

Dentro de todas las posibilidades de ajustes, se de establecen sólo algunos como preferentes (Tabla 5-1).

Tabla 5-1. Ajustes recomendados.

Sistema de ajuste				Clase	Características
Agujero único		Eje único			
Agujero	Eje	Eje	Agujero		
H7	s6/r6	h6	S7/R7	Forzado muy duro	Montaje por dilatación o contracción. No necesita seguro contra giro.
	n6		N7	Forzado duro	Montaje o desmontaje a presión. Necesita seguro contra giro.
	k6		K7	Forzado medio	Montaje y desmontaje con gran esfuerzo. Necesita seguro contra giro y deslizamiento.
	j6		J7	Forzado ligero	Montaje y desmontaje sin gran esfuerzo. Necesita seguro contra giro y deslizamiento.
	h6		H7	Deslizante	Piezas lubricadas. Deslizamiento a mano.
	g6		G7	Giratorio	Juego pequeño.
	f7		F8	Holgado medio	Juego mediano.
H9	h9	h9	H9	Deslizante	Montaje sin esfuerzo y desplazamiento.
	e9		E9	Giratorio	Móvil con juego
	d9		D9	Holgado	Móvil con juego amplio
H11	h11	h11	H11	Deslizante	Montaje fácil. Gran tolerancia.
	d11		E11	Giratorio	Gran tolerancia.
	c11		C11	Holgado	Gran tolerancia y juego
	a11		A11	Muy holgado	Gran tolerancia y mucho juego.

5.2 Problemas resueltos

5.2.1 Problema 1

Para el acoplamiento 70H6/j5 se pide:

a) **Determinar las dimensiones máximas y mínimas del eje y del agujero y realizar un esquema grafico de las posiciones de las zonas de tolerancia.**
b) **Indicar el tipo de ajuste y calcular la tolerancia del ajuste y los valores máximos y mínimos del juego o apriete.**

a) Dimensiones máximas y mínimas.

La dimensión nominal es dN = DN = 70 mm, que pertenece al grupo de dimensiones de valores de entre 50 a 80 mm.

Eje:

La tolerancia dimensional para la calidad del eje IT5 es t = 13 µm.

De la tabla de desviaciones fundamentales, para la posición **j**, la desviación inferior es

$$di = - 7\ \mu m$$

y la desviación superior, ds = di + t = 6 µm

La medidas límite, son:

Medida máxima, dM = dN + ds = 70,006 µm

Medida mínima, dm = dN + di = 69,993 µm

Agujero:

La tolerancia dimensional para la calidad del agujero IT6 es T = 19 µm.

De la tabla de desviaciones fundamentales, para la posición **H**, la desviación inferior es cero.

$$Di = 0\ \mu m$$

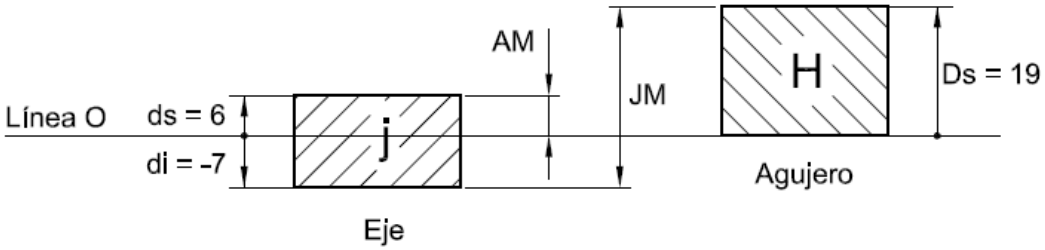
y la desviación superior, Ds = Di + T = 19 µm

La medidas límite, son:

Medida máxima, DM = DN + Ds = 70,019 µm

Medida mínima, Dm = DN + Di = 70,0 µm

La siguiente figura representa la posición de las zonas de tolerancia de eje y agujero.



b) Tipo de ajuste.

A la vista de figura anterior, las zonas de tolerancia del eje y agujero se solapan parcialmente, por lo que el ajuste es incierto (o indeterminado), con las siguientes características:

Juego máximo, JM = DM - dm = Ds - di = 19 - (-7) = 26 µm

Apriete máximo, AM = dM - Dm = ds - Di = 6 - 0 = 6 µm

Tolerancia del ajuste incierto, TI = JM + AM = T + t = 19 + 13 = 32 µm

5.2.2 Problema 2

Para el acoplamiento 90M8/s6 se pide:

a) Determinar las dimensiones máximas y mínimas del eje y del agujero y realizar un esquema grafico de las posiciones de las zonas de tolerancia.
b) Indicar el tipo de ajuste y calcular la tolerancia del ajuste y los valores máximos y mínimos del juego o apriete.

a) Dimensiones máximas y mínimas.

La dimensión nominal es dN = DN = 90 mm, que pertenece al grupo de dimensiones de valores de entre 80 a 120 mm.

Eje:

La tolerancia dimensional para la calidad del eje IT6 es t = 22 µm.

De la tabla de desviaciones fundamentales, para la posición **s**, la desviación inferior es

di = 71 µm

y la desviación superior, ds = di + t = 93 µm

La medidas límite, son:

Medida máxima, dM = dN + ds = 90,093 µm

Medida mínima, dm = dN + di = 90,071 µm

Agujero:

La tolerancia dimensional para la calidad del agujero IT8 es T = 54 µm.

De la tabla de desviaciones fundamentales, para la posición **M**, la desviación superior es

$$Ds = -13\ \mu m + \Delta$$

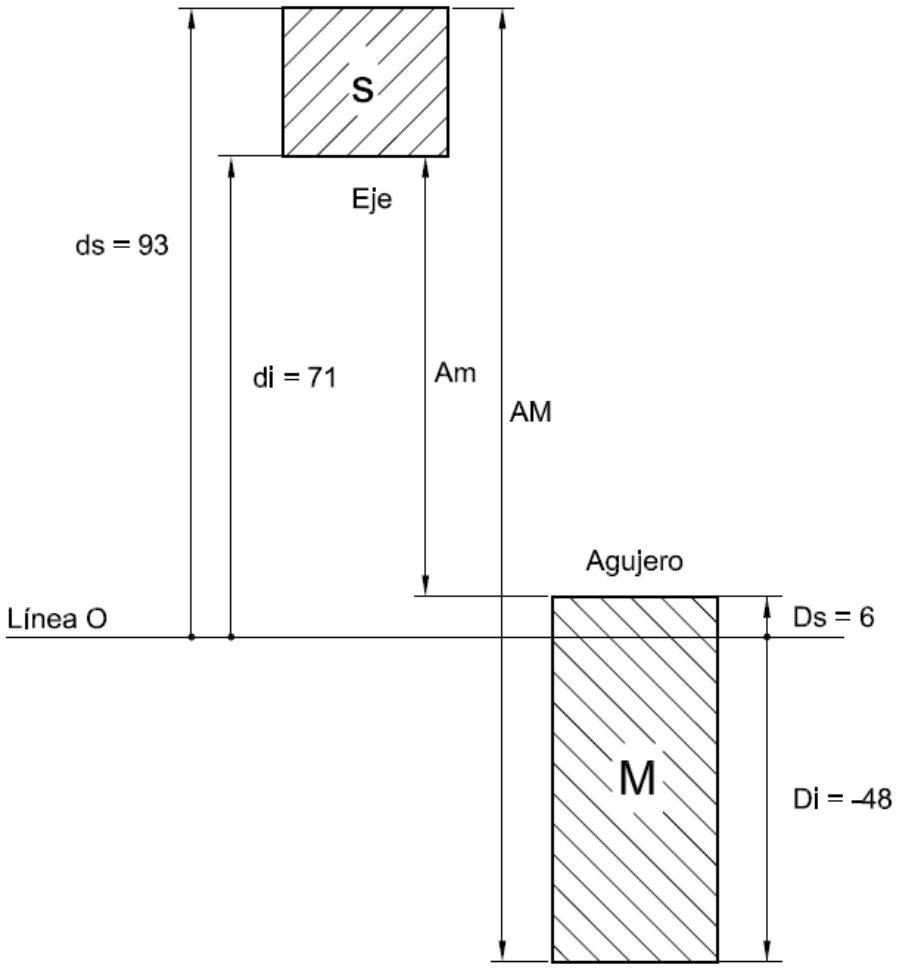
con Δ = 19 para calidad IT8. Por tanto, Ds = 6 µm.

La desviación inferior, Di = Ds - T = -48 µm

La medidas límite, son:

Medida máxima, DM = DN + Ds = 90,006 µm

Medida mínima, Dm = DN + Di = 89,952 µm



b) Tipo de ajuste.

La medida máxima del agujero es inferior a la medida mínima del eje, por lo tanto, las zonas de tolerancia de eje y agujero no se solapan, siendo un ajuste con aprieto. Donde:

Apriete máximo, AM = dM - Dm = ds - Di = 93 - (-48) = 141 µm

Apriete mínimo, Am = dm - DM = Ds - di = 6 - (-71) = 76 µm

Tolerancia del aprieto, TA = AM - Am = T + t = 54 + 22 = 76 µm

5.2.3 Problema 3

En un ajuste con juego con elementos interior y exterior de medida nominal 150 mm, el juego debe estar comprendido entre 40 µm y 150 µm. Se pide:

a) Determinar el ajuste normalizado ISO correspondiente al sistema de ajustes de agujero base.
b) Realizar un esquema gráfico del ajuste resultante.
c) Determinar la tolerancia del ajuste y los valores máximos y mínimos del juego.

a) Encontrar el ajuste normalizado del sistema de ajustes de agujero base.

La dimensión nominal es dN = DN = 150 mm, perteneciente al grupo de dimensiones de valores de entre 120 a 180 mm.

Para obtener el ajuste normalizado se deben seguir los siguientes pasos:

1. Calcular la tolerancia máxima del ajuste. En este caso, la tolerancia máxima del juego.

   JM = 150 µm, Jm = 40 µm

   TJ = JM - Jm = 150 - 40 = 110 µm

2. Seleccionar las calidades del eje y del agujero de manera que su suma sea inferior a la tolerancia del ajuste, pero lo más cercana posible. Además, se recomienda elegir la calidad del eje igual o mayor a la calidad del agujero (con una diferencia máxima de dos índices de calidad).

   $t + T \leq TJ$

   Buscamos la mejor combinación de calidades:

   IT7 + IT7 = 40 + 40 = 80 µm < 110 µm

   IT7 + IT8 = 40 + 63 = 103 µm < 110 µm

   IT8 + IT8 = 63 + 63 = 126 µm > 110 µm

   IT6 + IT8 = 25 + 63 = 88 µm < 110 µm

   La combinación IT7 + IT8 es la que más se aproxima a la tolerancia del ajuste. Se asignará la calidad IT7 al eje e IT8 al agujero.

   T = 63 µm, t = 40 µm

3. Determinar la posición de la zona de tolerancia del eje.

   Se empleará el sistema de ajustes de agujero base, que nos indica la posición H para el agujero. Resta por tanto determinar la posición de la zona de tolerancia del eje que permita cumplir con los juegos máximos y mínimos impuestos.

   150H8/_7

   El agujero está completamente definido, siendo:

   Di = 0 µm

   Ds = Di + T = 0 + 63 = 63 µm

   DM = DN + Ds = 150,063 µm

   Dm = DN + Di = 150,0 µm

   A partir de los valores de juego máximo y mínimo se calcula el intervalo admisible para la desviación fundamental del eje. Al estar el agujero en la posición H y ser un ajuste con juego, la posición de la zona de tolerancia del eje quedará por debajo de la línea cero (parte negativa) y vendrá definida por la desviación superior (desviación fundamental).

   Juego máximo, 150 µm ≥ DM - dm = Ds - di = Ds - (ds - t) = 63 - (ds - 40) → ds ≥ -47 µm

   Juego mínimo, 40 µm ≤ Dm - dM = Di - ds = 0 - ds → ds ≤ -40 µm

   La posición **f** para el eje indica ds = -43 µm, cumpliendo los límites calculados.

   La desviación inferior del eje será: di = ds – t = -83 µm

El ajuste queda definido como:

150H8/f7

b) Esquema del ajuste

   (ver página siguiente)

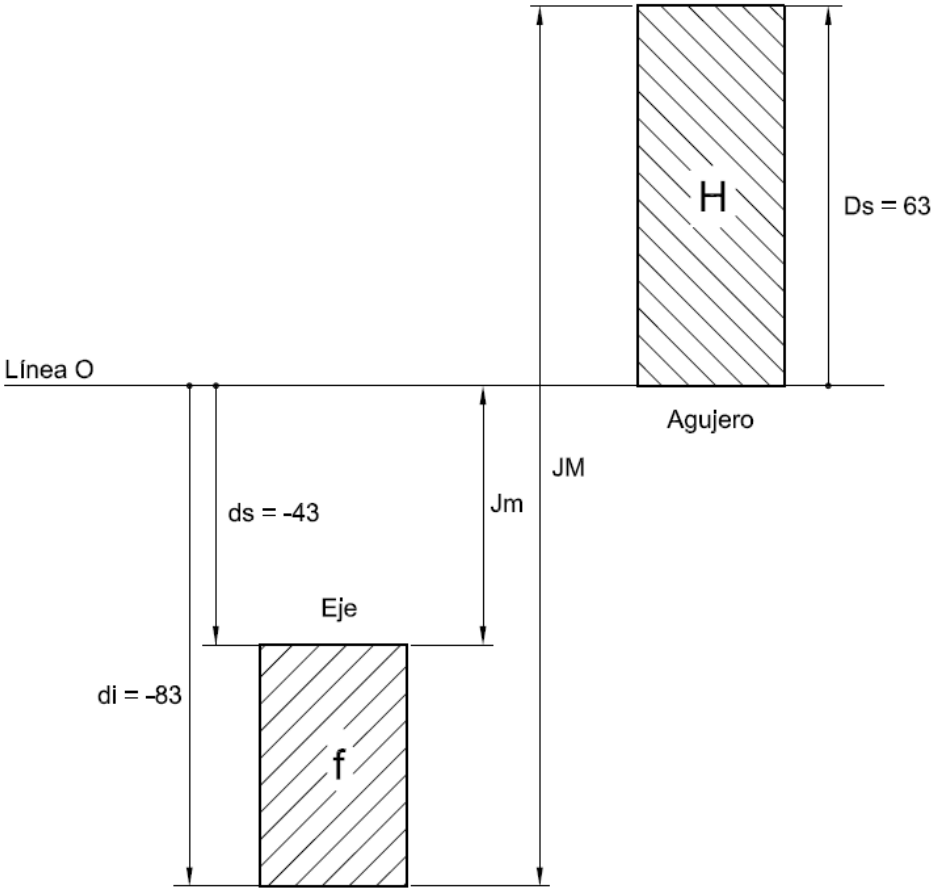
c) Tolerancia del ajuste.

   Una vez definido el ajuste, se calculan los juegos máximos y mínimos resultantes, que se encontrarán dentro del intervalo de juegos máximos y mínimos límites indicados en el enunciado del problema.

   Juego máximo, JM = DM - dm = Ds - di = 63 - (-83) = 146 µm

   Juego mínimo, Jm = Dm - dM = Di - ds = 0 - (-43) = 43 µm

   Tolerancia del juego, TJ = JM - Jm = 146 - 43 = 103 µm



5.2.4 Problema 4

En un ajuste incierto con eje y agujero de medida nominal 50 mm, se requiere un apriete menor o igual de 100 µm y un juego menor o igual de 20 µm. Se pide:

- **a) Determinar el ajuste normalizado ISO correspondiente al sistema de ajustes de agujero base.**
- **b) Realizar un esquema gráfico del ajuste resultante.**
- **c) Determinar la tolerancia del ajuste y los valores máximos y mínimos del ajuste.**
- **d) ¿Cuál será el ajuste normalizado resultante en el caso de emplear el sistema de ajustes de eje base?**

a) Encontrar el ajuste normalizado del sistema de ajustes de agujero base.

La dimensión nominal es dN = DN = 50 mm, perteneciente al grupo de dimensiones que incluye el intervalo de valores mayores de 30 mm hasta 50 mm (incluido).

1. Calcular la tolerancia máxima del ajuste.

   AM = 100 µm, JM = 20 µm

TI = JM + AM = 120 µm

2. Seleccionar las calidades del eje y del agujero de manera que su suma sea inferior a la tolerancia del ajuste, pero lo más cercana posible. Además, se recomienda elegir la calidad del eje igual o mayor a la calidad del agujero (con una diferencia máxima de dos índices de calidad).

   t + T ≤ TI

   Buscamos la mejor combinación de calidades:

   IT7 + IT8 = 25 + 39 = 64 µm < 120 µm

   IT7 + IT9 = 25 + 62 = 87 µm < 120 µm

   IT8 + IT9 = 39 + 62 = 101 µm < 120 µm

   IT9 + IT9 = 62 + 62 = 124 µm < 120 µm

   La combinación IT8 + IT9 es la que más se aproxima a la tolerancia máxima del ajuste. Se asignará la calidad mayor al eje (IT8) y la menor calidad al agujero (IT9).

   T = 62 µm, t = 39 µm

3. Determinar la posición de la zona de tolerancia del eje.

   El sistema de ajustes de agujero base establece la posición **H** para el agujero. Resta determinar la posición de la zona de tolerancia del eje.

   50H9/_8

   El agujero está completamente definido, siendo:

   Di = 0 µm

   Ds = Di + T = 0 + 62 = 62 µm

   DM = DN + Ds = 50,062 µm

   Dm = DN + Di = 50,0 µm

   A partir de los valores de juego máximo y apriete máximo se calcula el intervalo admisible para la desviación fundamental eje. Al estar el agujero en la posición **H** y ser un ajuste incierto, la posición de la zona de tolerancia del eje solapará con la zona de tolerancia del agujero.

   Asumiendo como desviación fundamental del eje la desviación inferior:

   Juego máximo, 20 µm ≥ DM - dm = Ds - di = 62 - di → di ≥ 42 µm

   Apriete máximo, 100 µm ≤ dM - Dm = di + t - Di = di + 39 - 0 → di ≤ 61 µm

   Las posiciones de eje **s** (di = 43 µm) y **t** (di = 54 µm) cumplen con los límites calculados. Se elegirá la posición **t** por estar más centrada dentro del intervalo.

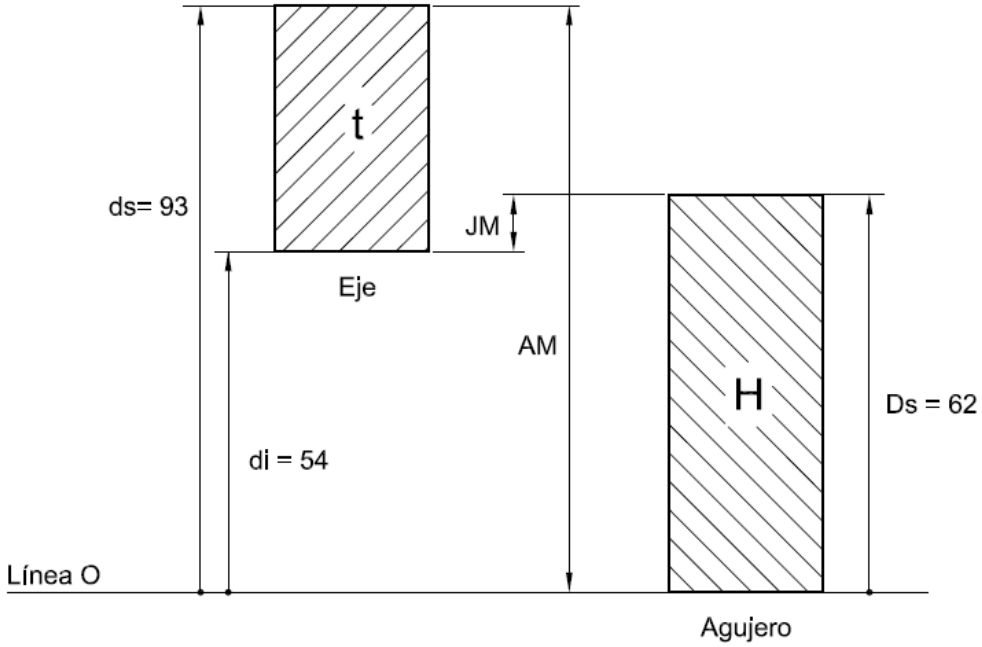
   di = 54 µm

La desviación superior del eje será: ds = di + t = 93 µm

El ajuste queda definido como:

50H9/t8

b) Esquema del ajuste.



c) Tolerancia del ajuste.

Una vez definido el ajuste, se calculan el juego y apriete máximos resultantes, que deben ser inferiores a los valores límites dados en el enunciado del problema.

Juego máximo, JM = DM - dm = Ds - di = 62 - 54 = 8 µm

Apriete máximo, AM = dM - Dm = ds - Di = 93 - 0 = 93 µm

Tolerancia del ajuste incierto, TI = JM + AM = 8 + 93 = 101 µm

d) Ajuste en el sistema de eje base.

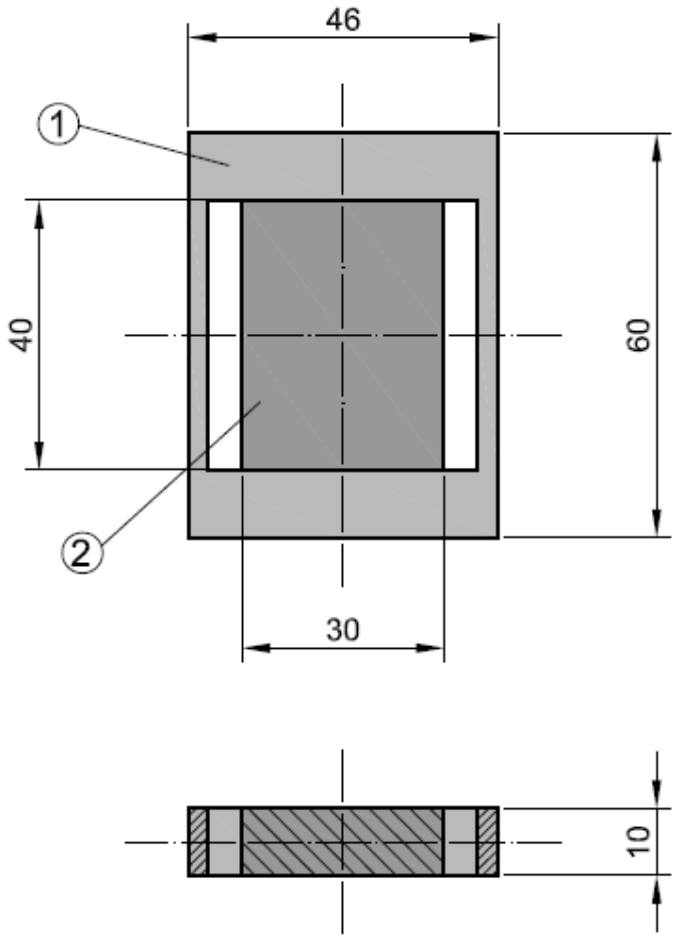
Una propiedad del sistema de ajustes ISO es que si se permutan las letras del eje y agujero el ajuste no se ve alterado. Por lo tanto, en el sistema de ajustes de eje base, el ajuste será:

50T9/h8

Se deja como trabajo del alumno la obtención de este ajuste paso a paso.

5.2.5 Problema 5

Las piezas de sección rectangular mostradas en la figura requieren ser ensambladas con una fuerza, F_{ext}, de entre 50 N y 250 N. Como se puede apreciar, el ajuste entre ambas piezas tiene lugar en las caras horizontales, teniendo suficiente holgura entre las caras verticales.



Se pide:

a) **Determinar el ajuste normalizado ISO correspondiente al sistema de ajustes de agujero base.**
b) **Realizar un esquema gráfico del ajuste resultante.**
c) **Determinar la tolerancia del ajuste y los valores máximos y mínimos del mismo.**

Datos:

Módulo de elasticidad, E = 2,8 GPa.
Coeficiente de fricción entre las superficies, μ = 0,3.

a) Encontrar el ajuste normalizado del sistema de ajustes de agujero base.

En este caso, antes de determinar el ajuste será necesario encontrar la relación entre la fuerza requerida en el ajuste y el valor del apriete (interferencia entre ambas piezas). Lógicamente, estamos hablando de un ajuste con apriete.

Al ensamblar ambas piezas, lo que ocurrirá es que la pieza exterior (agujero) se alargará y la pieza interior (eje) se verá comprimida. Se puede hacer la suposición de que el aumento de tamaño del agujero estará debido principalmente al alargamiento de los tramos verticales, de sección 10x3 mm^2 y de 40 mm de largo. Por otro lado, la pieza interior se contraerá en la dirección vertical, en la que consideraremos que su sección resistente es de 30x10 mm^2. La suma del alargamiento del agujero, ΔL_1, y del acortamiento del eje, ΔL_2, corresponderá con el valor del apriete requerido entre ambos elementos.

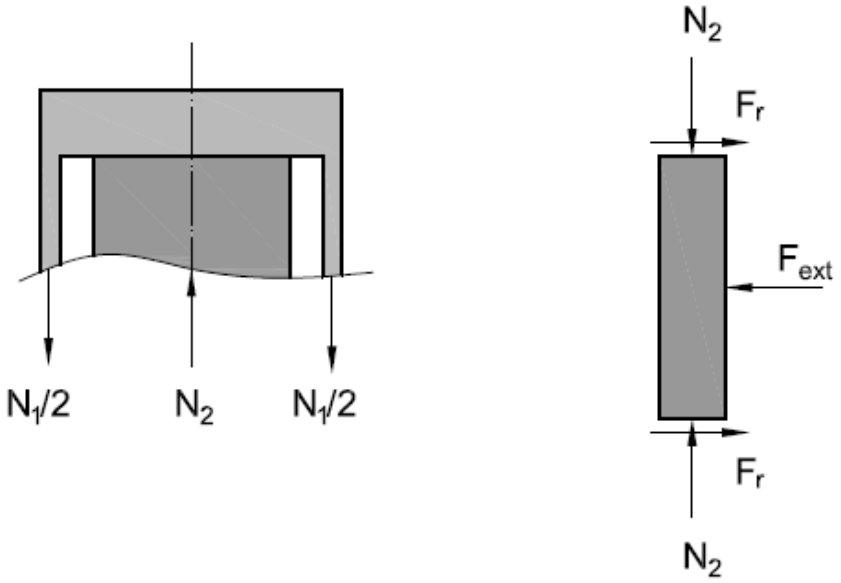
De esta forma, definiendo δ como la suma de dichos alargamiento/acortamiento:

$$\delta = |\Delta L_1| + |\Delta L_2|$$

$$\delta = \left|\frac{N_1 L_1}{E A_1}\right| + \left|\frac{N_2 L_2}{E A_2}\right|$$

Siendo N la fuerza normal de compresión entre ambas piezas en las superficies de contacto, los laterales de la pieza exterior se verán sometidos a una fuerza de tracción N_1 del mismo valor y la pieza interior se verá sometida a una fuerza de compresión N_2, siendo

$$N_1 = -N_2 = N$$



La fuerza exterior necesaria para ensamblar ambas piezas será aquella necesaria para vencer el rozamiento entre las caras en contacto, donde la fuerza de rozamiento en cada cara es:

$$F_r = \mu N$$

Fijándonos en la figura anterior que muestra el diagrama de cuerpo libre del eje, se puede deducir que la fuerza exterior tomará el valor de

$$F_{ext} = 2\mu N$$

Una vez comprendido el comportamiento de la unión. La solución del problema se obtiene partiendo de los valores límites requeridos para la fuerza exterior; con los cuales se deducirá el valor del incremento de longitud δ. De esta manera:

$$F_{ext} = 50 \text{ N}$$

$$N = \frac{F_{ext}}{2\mu} = 86{,}67 \text{ N}$$

$$\delta = \frac{N}{E}\left(\frac{L_1}{A_1} + \frac{L_2}{A_2}\right) = \frac{86{,}67 \text{ N}}{2800 \text{ N/mm}^2}\left(\frac{40 \text{ mm}}{10 \cdot 3 \cdot 2 \text{ mm}^2} + \frac{40 \text{ mm}}{30 \cdot 10 \text{ mm}^2}\right) = 0{,}0238 \text{ mm}$$

$$F_{ext} = 250 \text{ N}$$

$$N = \frac{F_{ext}}{2\mu} = 433{,}35 \text{ N}$$

$$\delta = \frac{N}{E}\left(\frac{L_1}{A_1} + \frac{L_2}{A_2}\right) = \frac{433{,}35 \text{ N}}{2800 \text{ N/mm}^2}\left(\frac{40 \text{ mm}}{10 \cdot 3 \cdot 2 \text{ mm}^2} + \frac{40 \text{ mm}}{30 \cdot 10 \text{ mm}^2}\right) = 0{,}119 \text{ mm}$$

De esta forma, los aprietes mínimo y máximo quedan definidos como:

$$F_{ext} = 50 \text{ N} \rightarrow \ \delta = 23{,}8 \text{ µm} \rightarrow \text{Am} = 24 \text{ µm}$$

$$F_{ext} = 250 \text{ N} \rightarrow \ \delta = 119 \text{ µm} \rightarrow \text{AM} = 119 \text{ µm}$$

Llegados a este punto, el ajuste se resuelve como en los problemas anteriores.

La dimensión nominal es dN = DN = 40 mm, perteneciente al grupo de dimensiones de valores de entre 30 a 50 mm.

Para obtener el ajuste normalizado se siguen los pasos habituales:

1. Calcular la tolerancia máxima del ajuste. En este caso, la tolerancia máxima del apriete.

   AM = 119 µm, Am = 24 µm

   TA = AM - Am = 119 - 24 = 95 µm

2. Seleccionar las calidades del eje y del agujero de manera que su suma sea inferior a la tolerancia del ajuste, pero lo más cercana posible. Con calidad del eje igual o mayor a la calidad del agujero (con una diferencia máxima de dos índices de calidad).

   t + T ≤ TA

Buscamos la mejor combinación de calidades:

IT7 + IT8 = 25 + 39 = 64 µm < 95 µm

IT8 + IT8 = 39 + 39 = 78 µm < 95 µm

IT8 + IT9 = 39 + 62 = 101 µm > 95 µm

IT7 + IT9 = 25 + 62 = 87 µm < 95 µm

La combinación IT7 + IT9 es la que más se aproxima a la tolerancia del ajuste. Se asignará la calidad IT7 al eje e IT9 al agujero.

T = 62 µm, t = 25 µm

3. Determinar la posición de la zona de tolerancia del eje.

Se empleará el sistema de ajustes de agujero base, que nos indica la posición H para el agujero. Resta por tanto determinar la posición de la zona de tolerancia del eje que permita cumplir con los juegos máximos y mínimos impuestos.

40H9/_7

El agujero está completamente definido, siendo:

Di = 0 µm

Ds = Di + T = 0 + 62 = 62 µm

DM = DN + Ds = 40,062 µm

Dm = DN + Di = 40,0 µm

A partir de los valores de apriete máximo y mínimo se calcula el intervalo admisible para la desviación fundamental eje. Al estar el agujero en la posición H y ser un ajuste con apriete, la posición de la zona de tolerancia del eje quedará por encima de la línea cero (parte positiva) y vendrá definida por la desviación inferior.

Apriete máximo, 119 µm ≥ dM - Dm = (di + t) - Di = (di + 25) - 0 → di ≤ 94 µm

Apriete mínimo, 24 µm ≤ dm - DM = di – (Di + T) = di – (0 + 62) → di ≥ 86 µm

La posición **y** para el eje indica di = 94 µm, cumpliendo los límites calculados.

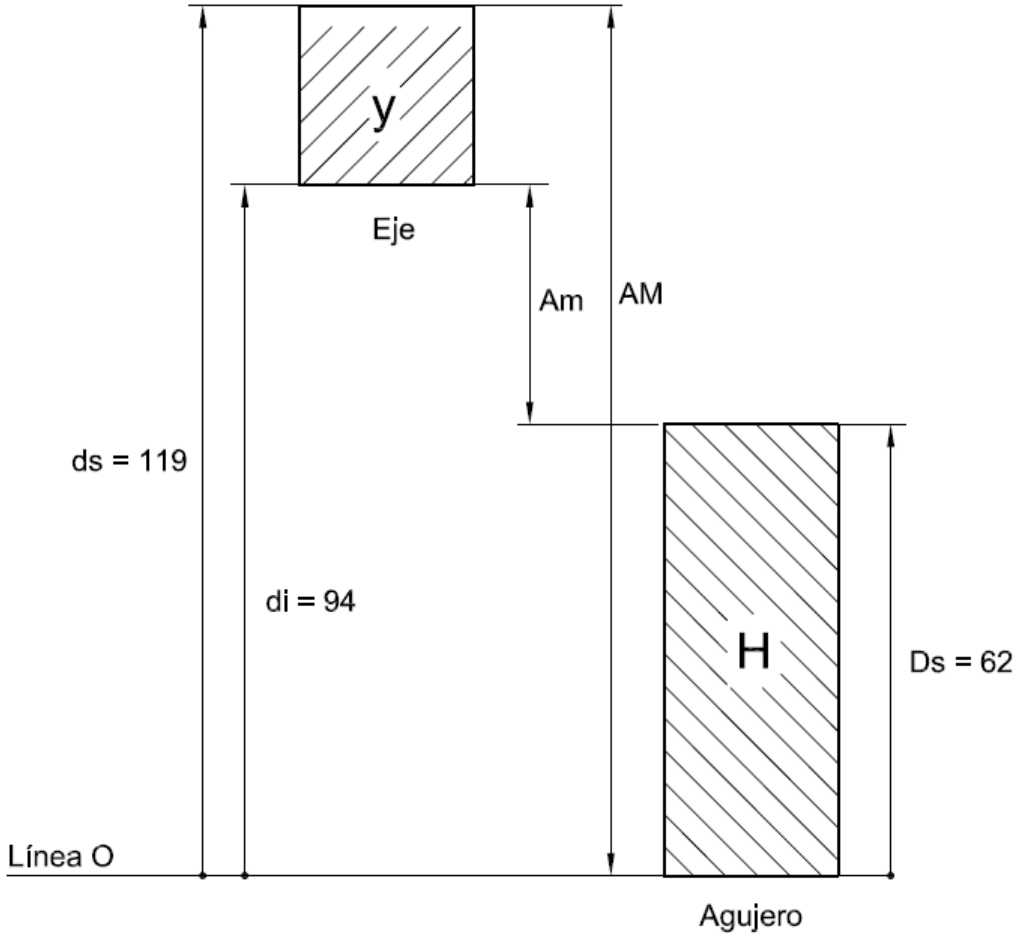
La desviación superior del eje será: ds = di + t = 119 µm

El ajuste queda definido como:

4**0H9/y7**

b) Esquema del ajuste

(ver página siguiente)



c) Tolerancia del ajuste.

Una vez definido el ajuste, se calculan los aprietes máximo y mínimos resultantes.

Apriete máximo, AM = dM - Dm = (di + t) - Di = (94 + 25) - 0 = 119 µm

Apriete mínimo, Am = dm - DM = Di - ds = di – (Di + T) = 94 – (0 + 62) = 32 µm

Tolerancia del apriete, TA = AM - Am = 119 - 32 = 87 µm

5.3 Problemas propuestos

5.3.1 Problema propuesto 1

Para el acoplamiento 60H7/m6 se pide:

a) Determinar las dimensiones máximas y mínimas del eje y del agujero y realizar un esquema grafico del mismo acotando todas las dimensiones conocidas.
b) Indicar el tipo de ajuste, y calcular la tolerancia del ajuste y los valores máximos y mínimos del juego o apriete.

Solución: **Ajuste indeterminado. JM = 19 µm. AM = 30 µm**

5.3.2 Problema propuesto 2

En un ajuste incierto con eje y agujero de medida nominal 80 mm, se requiere un juego que este comprendido entre 250 µm como máximo y 30 µm como mínimo. Se pide:

a) Determinar el ajuste normalizado ISO correspondiente al sistema de ajustes de eje base.
b) Realizar un esquema gráfico del ajuste resultante acotando todas las dimensiones conocidas.
c) Determinar la tolerancia del ajuste y los valores máximos y mínimos.
d) ¿Cuál será el ajuste normalizado resultante en el caso de emplear el sistema de ajustes de agujero base?

Solución: **a) 80F10/h9. c) JM = 224 µm, Jm = 30 µm, TJ = 194 µm. d) 80H10/f9**

5.3.3 Problema propuesto 3

En un ajuste incierto con eje y agujero de medida nominal 36 mm, se requiere un apriete que se encuentre entre 50 µm y 120 µm. Se pide:

a) Determinar el ajuste normalizado ISO estando definida la posición **N** para el agujero.
b) Realizar un esquema gráfico del ajuste resultante acotando todas las dimensiones conocidas.
c) Determinar la tolerancia del ajuste y los valores máximos y mínimos.

Solución: **a) 35N8/t7. c) AM = 115 µm, Am = 51 µm, TA = 64 µm**

Tema 6. Rugosidad superficial

6.1 Fundamento teórico

El acabado superficial de los cuerpos puede presentar errores de forma macrogeométricos tales como defectos en la dimensión o en la forma o, microgeométricos donde se incluye la rugosidad superficial. Las imperfecciones microgeométricas pueden clasificarse en ondulaciones (ocasionadas por los desajustes de la máquina-herramienta empleados en fabricar la pieza), rugosidades (son el resultado de las huellas de las herramientas utilizadas para la fabricación de la pieza) o mixtas (una combinación de ondulaciones o rugosidades). En este tema se va a tratar el tema de las rugosidades superficiales.

La rugosidad superficial, se mide con unos dispositivos conocidos como rugosímetros. El principio de operación de este instrumento es muy simple: una fina punta o estilete, por lo regular de diamante o carburo de tungsteno, realiza un barrido en línea recta sobre la superficie de estudio, a través de la cual analiza las variaciones del material que luego son convertidas en señales eléctricas para ser registradas o graficadas. Los componentes básicos de un rugosímetro son:

- El palpador/transductor que puede ser óptico o mecánico. En los rugosímetros mecánicos, los transductores pueden ser de tipo inductivo, capacitivo o piezoeléctrico en función del mecanismo de generación de la señal eléctrica.
- El mecanismo de soporte y arrastre del palpador.
- El amplificador electrónico de la señal.
- Un calculador.
- El registrador o memoria.
- En su caso conexiones para los periféricos

Se puede definir rugosidad superficial como el conjunto de irregularidades de la superficie real, definidas convencionalmente en una sección donde los errores de forma y las ondulaciones han sido eliminados. Para definir los parámetros más importantes de rugosidad se utiliza el perfil real de rugosidad que es el perfil resultante de la intersección de un plano perpendicular a la superficie real de estudio con esta misma. A continuación, se detallan algunos de los parámetros de rugosidad más importantes empleados en la práctica.

Longitud de palpación (L_{TOTAL}): es el recorrido total que hace el palpador del rugosímetro sobre la superficie de estudio.

Longitud de pre-evaluación (L_{PRE})*:* Longitud recorrida inicialmente por el palpador pero que no es utilizada para el cálculo de los parámetros de rugosidad.

Longitud de post-evaluación (L_{POST}): Ultima parte del recorrido efectuado por el palpador pero que no es utilizada para el cálculo de los parámetros de rugosidad.

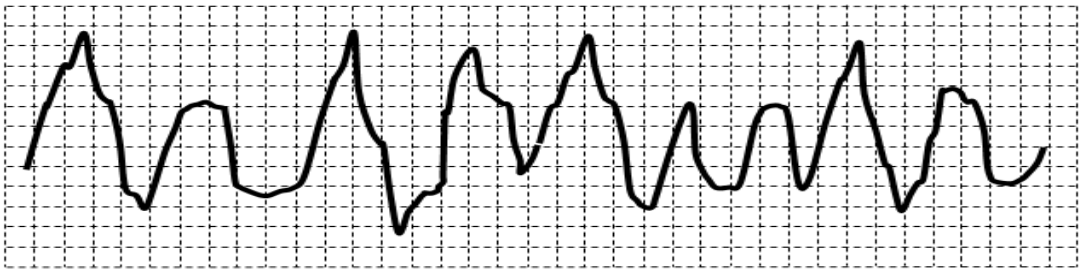


Figura 6-1. Ejemplo de perfil de rugosidad.

Longitud básica (L_B): Longitud de la línea de referencia utilizada para separar las irregularidades que forman la rugosidad superficial.

Longitud de evaluación (L_{EVAL}): Longitud utilizada para determinar los valores de los parámetros de rugosidad superficial. Su longitud es igual a la de 5 longitudes básicas.

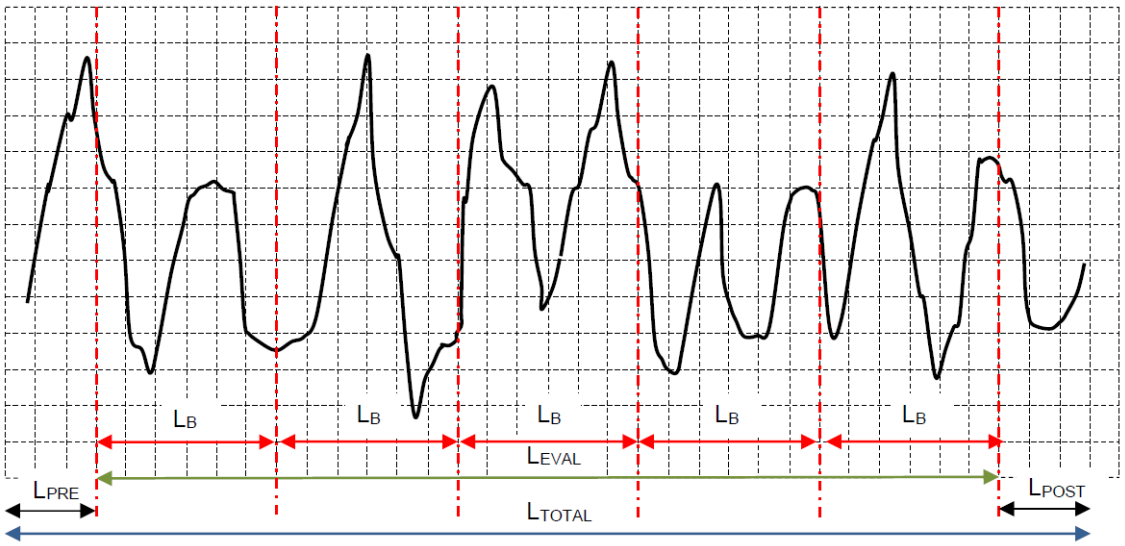


Figura 6-2. Longitudes del perfil.

Línea media aritmética (o línea central): Línea de referencia con la forma del perfil geométrico, paralela a la dirección general del perfil en el interior de la longitud básica que divide el perfil de modo que la suma de áreas comprendidas entre ella y el perfil es igual en la parte superior e inferior.

Cresta del perfil: Parte del perfil dirigida hacia el exterior del cuerpo uniendo dos intersecciones consecutivas del perfil con la línea media.

Valle del perfil: Parte del perfil dirigida hacia el interior del cuerpo uniendo dos intersecciones consecutivas del perfil con la línea media.

Altura de una cresta del perfil (y_P): Distancia entre la línea media y el punto más alto de una cresta.

Profundidad de un valle del perfil (y_V): Distancia entre la línea media y el punto más bajo de un valle.

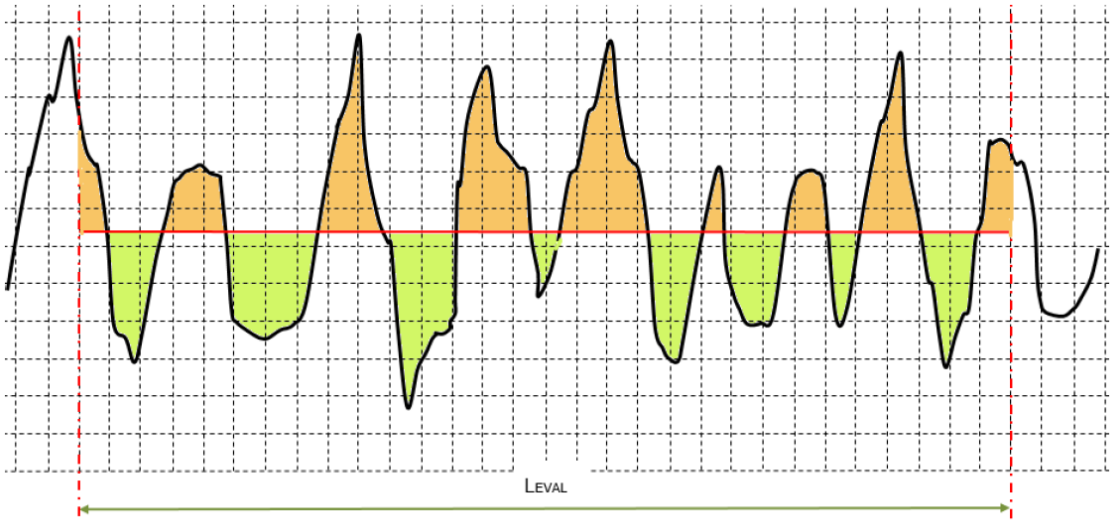


Figura 6-3. Línea central del perfil de rugosidad.

Altura de una irregularidad del perfil (h): Suma de la altura de una cresta y de la profundidad de un valle adyacentes.

Altura máxima de una cresta (R_P): Distancia del punto más alto del perfil a la línea media, dentro de la longitud de evaluación, es decir, la cresta más alta.

Profundidad máxima de un valle (R_m): Distancia del punto más bajo del perfil a la línea media, dentro de la longitud de evaluación, es decir, el valle más profundo.

Altura máxima del perfil (R_{max}): Distancia entre la cresta más alta (R_P) y el valle más bajo (R_m).

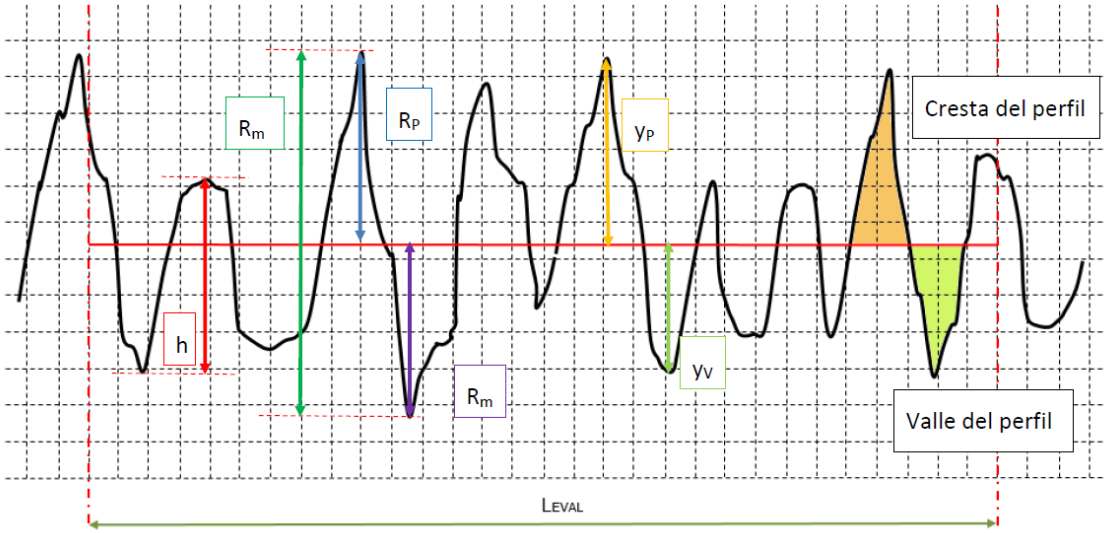


Figura 6-4. Parámetros de rugosidad (I).

Altura de las irregularidades en diez puntos (R_Z): Media de los valores absolutos de las alturas de las cinco crestas del perfil más altas y de las profundidades de los cinco valles del perfil más bajos, dentro de la longitud de evaluación.

$$R_z = \frac{\sum_1^5 y_{Pi} + \sum_1^5 y_{Vi}}{5}$$

Altura media de las irregularidades del perfil (R_C): es la suma de los valores medios de las alturas de las crestas y de las profundidades de los valles, dentro de la longitud de evaluación.

$$R_C = \frac{\sum_1^n y_{Pi} + \sum_1^n y_{Vi}}{n}$$

Rugosidad media (R_a): Es el valor medio aritmético de los valores absolutos de las distancias del perfil de rugosidad a la línea media dentro del tramo de medición. El valor de rugosidad medio es equiparable a la altura de un rectángulo cuya longitud es igual a la longitud de evaluación y que tiene la misma superficie que la superficie situada entre el perfil de rugosidad y la línea media.

Paso de las irregularidades del perfil (S_m): Longitud de la línea media que contiene una cresta y un valle consecutivos.

Paso de las crestas locales del perfil (S): Longitud de una sección de la línea media delimitada por la proyección sobre esta línea de los dos puntos más altos de las crestas locales adyacentes del perfil.

Longitud desarrollada del perfil (L_0): Longitud que se obtendría al desarrollar el perfil en línea recta.

Relación de longitud del perfil (L_r): Relación entre la longitud desarrollada y la longitud básica.

$$L_r = \frac{L_0}{L_B}$$

Longitud portante del perfil (μ_p): Suma de las longitudes de los segmentos obtenidos cortando las crestas por una línea paralela a la línea media, dentro de la longitud de evaluación, para un nivel de corte dado.

$$\mu_P = b_1 + b_2 + \cdots + b_n$$

Tasa de longitud portante (t_p): Relación de la longitud portante a la longitud básica.

$$t_P = \frac{\mu_P}{L_B}$$

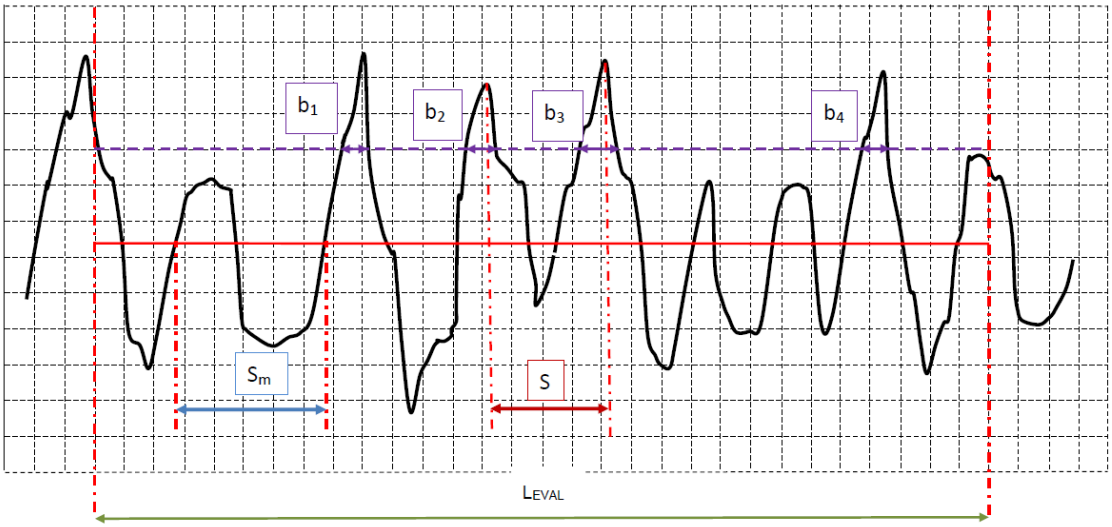


Figura 6-5. Parámetros de rugosidad (II).

La rugosidad superficial es un factor muy importante en la aplicación o uso de un elemento mecánico de modo que se ha establecido una escala de calidades de rugosidad dependiendo de las distintas aplicaciones (Tabla 6-1 y Tabla 6-2).

Tabla 6-1. Calidades de rugosidad superficial.

Clase	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12
Ra (µm)	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50

Tabla 6-2. Aplicación según la calidad superficial.

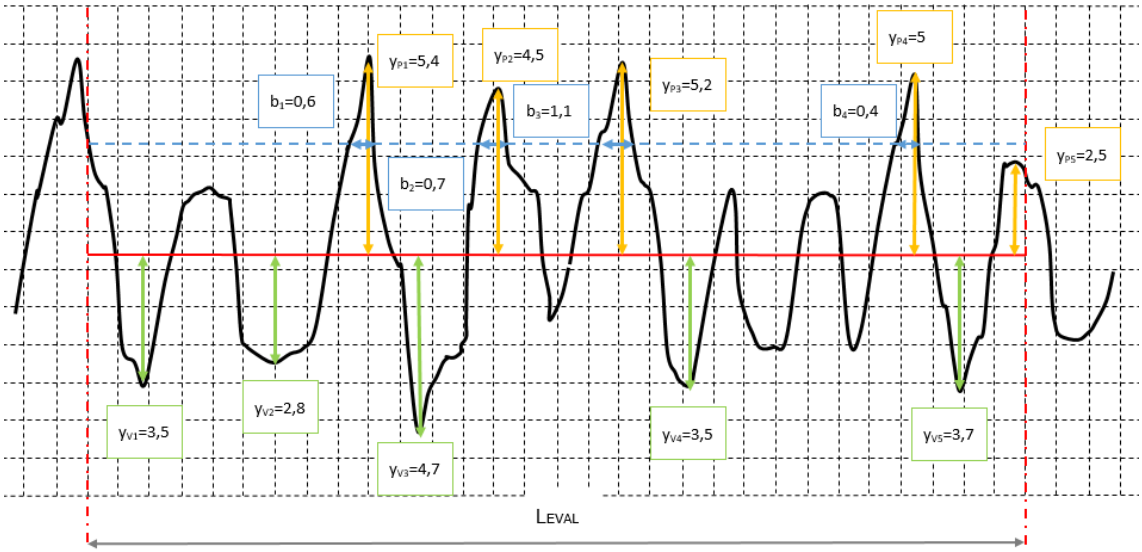
Rugosidad	Aplicación
N1	Espejos. Bloques patrón
N2	Planos de apoyo de relojes comparadores
N3	Herramientas de precisión. Cojinetes superacabados. Acoplamientos estancos de alta presión.
N4	Soportes de cigüeñal y árboles de levas. Pies de válvulas. Superficies de cilindros de bombas hidráulicas.
N5	Árboles acanalados. Superficie exterior de pistones. Acoplamientos a presión. Asientos de válvulas.
N6	Tambores de freno. Cojinetes de bronce. Dientes de engranaje. Superficies para patines y guías deslizantes.
N7	Árboles y orificios de engranajes. Cara de émbolo.
N8	Pernos y cojinetes para transmisión. Superficies de acoplamiento de partes fijas desmontables.

6.2 Problemas resueltos

6.2.1 Problema 1

En el laboratorio de metrología se ha medido la rugosidad superficial de una pieza mecánica obteniéndose el siguiente perfil de rugosidad. Considerando que cada cuadrado es de 1 cm de lado, obtener: R_{max}, R_z, longitud portante a la altura de 3 cm sobre la línea central y profundidad de los dos valles más profundos del perfil.

Para comenzar, se representan cada uno de los parámetros pedidos en el perfil de rugosidad y se calculan matemáticamente.



$$R_{max} = R_p + R_m = y_{p1} + y_{V3} = 5{,}4 + 4{,}7 = 10{,}1 \text{ cm}$$

$$R_z = \frac{\sum_1^5 y_{Pi} + \sum_1^5 y_{Vi}}{5} = \frac{(5{,}4 + 4{,}5 + 5{,}2 + 5 + 2{,}5) + (3{,}5 + 2{,}8 + 4{,}7 + 3{,}5 + 3{,}7)}{5}$$
$$= 8{,}16 \text{ cm}$$

$$\mu_P = b_1 + b_2 + b_3 + b_4 = 0{,}6 + 0{,}7 + 1{,}1 + 0{,}4 = 2{,}8 \text{ cm}$$

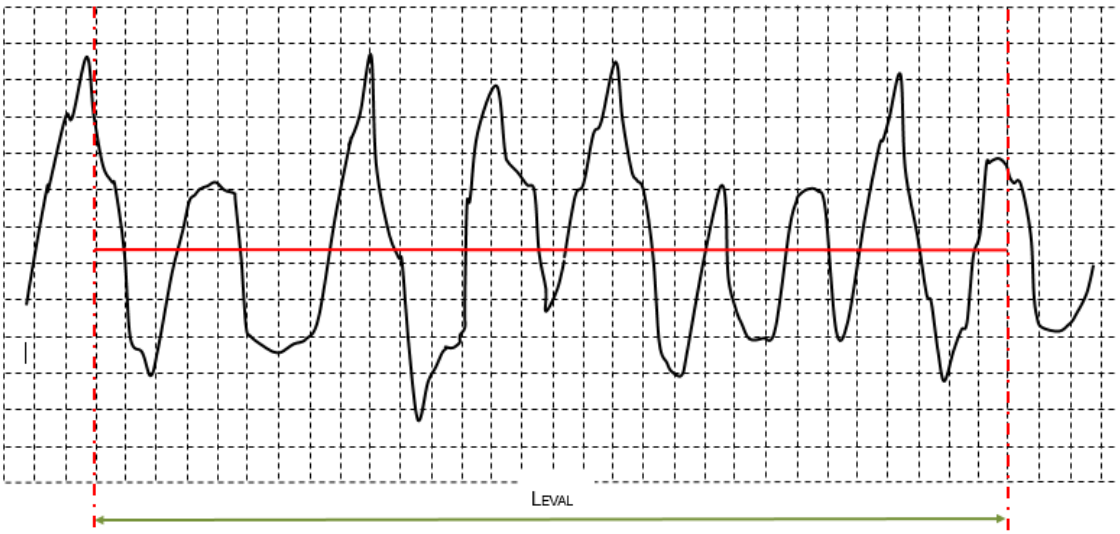
$$y_{V3} = 4{,}7 \text{ cm}$$

$$y_{V5} = 3{,}7 \text{ cm}$$

6.3 Problemas propuestos

6.3.1 Problema propuesto 1

Dado el perfil de rugosidad de la figura y, considerando que cada cuadrado tiene 1 cm de lado, calcular en el mismo, los siguientes parámetros de rugosidad: longitud básica (L_B), altura máxima de una cresta (R_p), profundidad máxima de un valle (R_m), altura de la irregularidad del perfil correspondiente a la cresta más baja (h), altura media de las irregularidades del perfil (R_C), relación de longitud del perfil si la longitud desarrollada del perfil es L_0=60 cm, longitud portante del perfil a la altura de 2 cm sobre la línea central (μ_P).



***Solución*: $L_B = 6$ cm. $R_p = 5,4$ cm. $R_m = 4,7$ cm. $h = 3,9$ cm. $R_C = 6,5$ cm.**

$L_r = 10$ cm. $\mu_P = 6,5$ cm.

Tema 7. Dureza superficial

7.1 Fundamento teórico

La dureza de un material puede definirse como la resistencia que opone el mismo a la deformación plástica permanente de su superficie ya sea por rayado o penetración. Se puede definir también a la dureza de un material como la propiedad de la capa superficial de dicho material de poder resistir toda deformación elástica, plástica o destrucción debido a la acción de esfuerzos de contacto locales originados por otro cuerpo (llamado penetrador), más duro, de determinada forma y dimensiones, el cual no sufre deformaciones residuales durante el contacto. Por tanto, la dureza, por definición es una propiedad de la superficie del material no una propiedad del material en sí.

El concepto de dureza fue tratado por primera vez en 1820 por Friedrich Mohs que creó la primera escala de dureza, siendo el Talco el material más blando y el diamante el más duro en una escala de 1 a 10.

Tabla 7-1. Escala Mohs de dureza de los materiales.

Escala Mohs de dureza de los materiales	
Dureza Mohs	Material de Referencia
1	Talco
2	Yeso
3	Calcita
4	Fluorita
5	Apatito
6	Feldespato
7	Cuarzo
8	Topacio
9	Corindón
10	Diamante

La dureza de un material se determina con ensayos con dispositivos denominados durómetros. Estos ensayos consisten en producir una deformación local, en el material que se ensaya, a través de un penetrador. Las variables a tener en cuenta a la hora de realizar un ensayo de dureza son: el tipo de penetrador, la carga aplicada, la velocidad de aplicación de la carga y el tiempo de aplicación de la misma. En la actualidad, las escalas de dureza más utilizadas son la escala Brinell, la escala Vickers y la escala Rockwell, de modo que en este texto se van a explicar cada una de ellas. Estos ensayos se caracterizan por aplicar la carga de forma estática presionando el penetrador lentamente contra la superficie de ensayo.

Ensayo Brinell

El ensayo de dureza Brinell consiste en presionar la superficie del material a ensayar con un penetrador en forma de bola, de acero muy duro o carburo de tungsteno, produciéndose la impresión de un casquete esférico correspondiente a la porción de la esfera que penetra. Las cargas empleadas en este ensayo suelen ser altas pudiendo llegar hasta los 3000 kp.

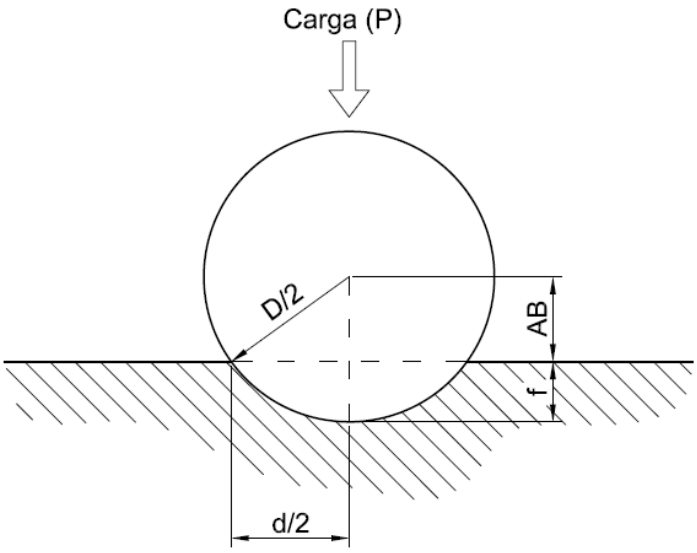


Figura 7-1. Esquema del ensayo Brinell.

La Figura 7-1 muestra el penetrador en forma de esfera con diámetro D y el diámetro de la huella que deja el penetrador en la superficie de ensayo, d.

El valor de dureza también conocido como número de Brinell HB, se calcula de la siguiente forma:

$$HB = \frac{P}{S}\left[\frac{\text{kp}}{\text{mm}^2}\right]$$

Siendo P la carga aplicada y S la superficie del casquete dejado por el penetrador.

En el laboratorio de Metrología, para calcular el número HB, una vez hecha la huella con el penetrador en la superficie de ensayo, se mide dicha huella con un microscopio de modo que se pueda calcular la dureza mediante la siguiente expresión.

$$HB = \frac{P}{S} = \frac{P}{\pi \cdot D \cdot f}$$

$$f = \frac{D}{2} - AB = \frac{D}{2} - \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} = \frac{1}{2} \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)$$

$$HB = \frac{P}{\pi \cdot D \cdot f} = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)}$$

La indicación del valor de dureza Brinell debe ir acompañado de la indicación de las condiciones de ensayo tales como diámetro del penetrador, carga aplicada y tiempo de aplicación, de la siguiente forma:

$$n\ HB\ P1/P2/P3$$

donde:

n: valor numérico de la dureza obtenida.

$P1$: diámetro de la bola del penetrador (D), en mm.

$P2$: carga aplicada (P), en kp.

$P3$: tiempo de aplicación de la carga en segundos.

Por último, comentar que este ensayo es adecuado para materiales cuya dureza Brinell es inferior a 600 HB y que a partir de los 400 HB se recomienda utilizar penetradores duros (de carburos metálicos). A partir de estos valores de dureza la deformación en el penetrador comienza a ser importante, y esta debe ser menor de ±0,005D. A partir de los 400 HB es recomendable utilizar otro ensayo de dureza como Rockwell o Vickers. Por otro lado, este ensayo no es adecuado para piezas de espesor delgado ya que la penetración podría ser mayor que el espesor de la propia pieza.

La dureza Brinell de algunos de los materiales más utilizados se muestra en la Tabla 7-2.

Tabla 7-2. Valores aproximados de dureza Brinell para algunos materiales.

Material	HB (kp/mm^2)
Acero templado para herramientas	500
Acero al cromo templado y revenido	280
Acero duro (0,8% C)	210
Fundición gris	180
Acero dulce (0,1% C)	110
Bronce	100
Latón fundido	80
Latón	50
Cinc	40
Aluminio	25-30
Aluminio puro	16
Estaño	14
Plomo	7

Ensayo Vickers

La determinación de la dureza Vickers es similar a la Brinell ya que se obtiene del cociente de la carga aplicada entre la superficie de la huella dejada por el penetrador. La diferencia está en que en este caso el penetrador es un diamante en forma de pirámide de base cuadrada a 136° y las cargas utilizadas son bastante menores (hasta 120 kp, la carga más empleada es la de 30 kp).

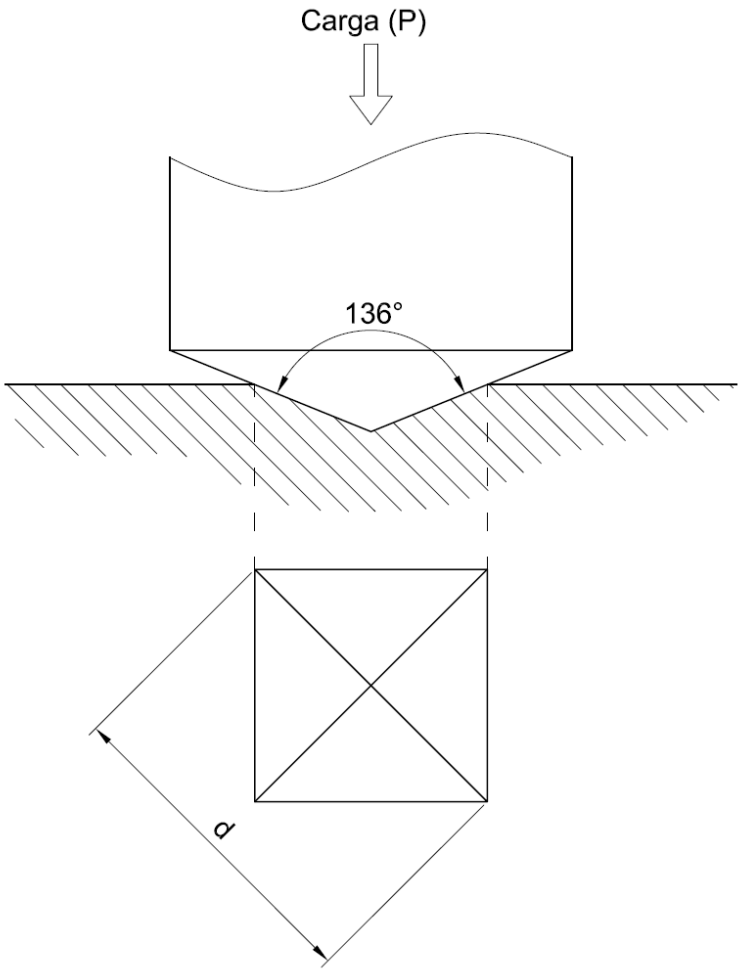


Figura 7-2. Esquema del ensayo Vickers.

En el laboratorio de Metrología, para calcular el número HV, una vez hecha la huella con el penetrador en la superficie de ensayo, se miden ambas diagonales de dicha huella con un microscopio y se hace la media de ellas de modo que se pueda calcular la dureza mediante la siguiente expresión:

$$HV = \frac{P}{S} = 1{,}8544 \cdot \frac{P}{d^2} \left[\frac{kp}{mm^2}\right]$$

donde:

P: es la carga aplicada, en kg.

d: es la media de las diagonales de la huella dejada por el penetrador, en mm.

La indicación del valor de dureza Vickers debe ir acompañado del valor de la carga aplicada, de la siguiente forma:

$$n\ HV_{P1}$$

donde:

n: valor numérico de la dureza obtenida.

$P1$: carga aplicada (P), en kg.

Por último, comentar que este ensayo es adecuado para materiales cuya dureza es mayor a 400-500 HB. Para materiales con una dureza inferior, se recomienda emplear el ensayo de dureza Brinell. En todo caso, el ensayo Vickers se considera una mejora del ensayo de dureza Brinell, ya que permite ensayar materiales con superficies no planas y con espesores más pequeños.

Ensayo Rockwell

El ensayo Rockwell es el método más extendido, ya que la dureza se obtiene directamente del dial indicador de la máquina de ensayo (no requiere de la utilización de fórmula alguna para la determinación de la dureza) y es un modelo de ensayo apto para ser empleado en todo tipo de materiales.

Al igual que en los ensayos anteriores, la dureza se determina en función del grado de penetración en la pieza a ensayar a causa de la acción del penetrador bajo una carga estática dada. Este ensayo difiere del Brinell en que las cargas son menores y los penetradores más pequeños por lo que la huella será menor y menos profunda.

Hay varios tipos de ensayos Rockwell dependiendo del tipo de material, penetrador y carga utilizada para el mismo:

- *Materiales duros:* se utiliza un penetrador de diamante con forma de cono. Hay varios tipos de ensayos, entre los que destacan los siguientes, siendo el ensayo HRC el más común.
    - HRA: en este ensayo la carga aplicada es de 60 kp.
    - HRC: en este ensayo la carga aplicada es de 150 kp.
    - HRD: en este ensayo la carga aplicada es de 100 kp.

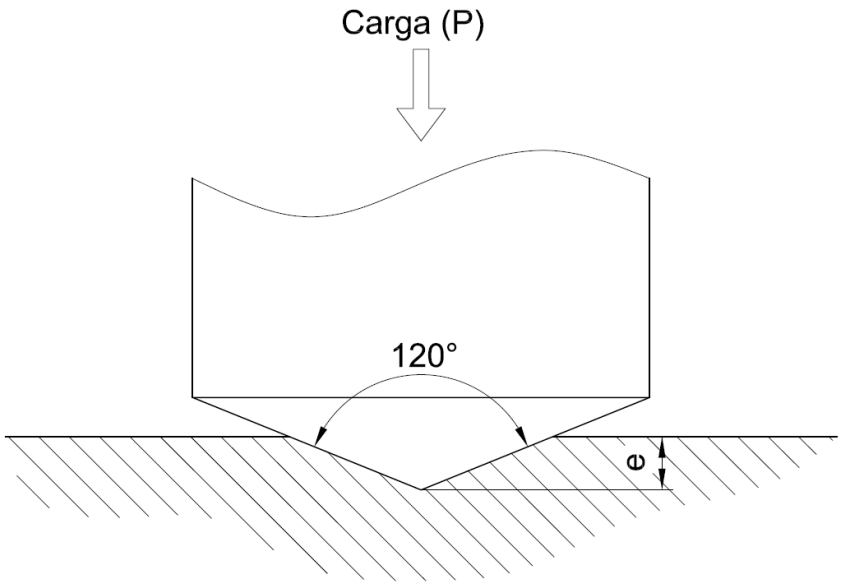


Figura 7-3. Esquema del ensayo Rockwell HRA, HRC y HRD

- *Materiales blandos:* se utiliza un penetrador de acero con forma de esfera y diámetro 1,59 mm. Hay varios tipos de ensayos, entre los que destacan:
    - HRB: en este ensayo la carga aplicada es de 100 kp.

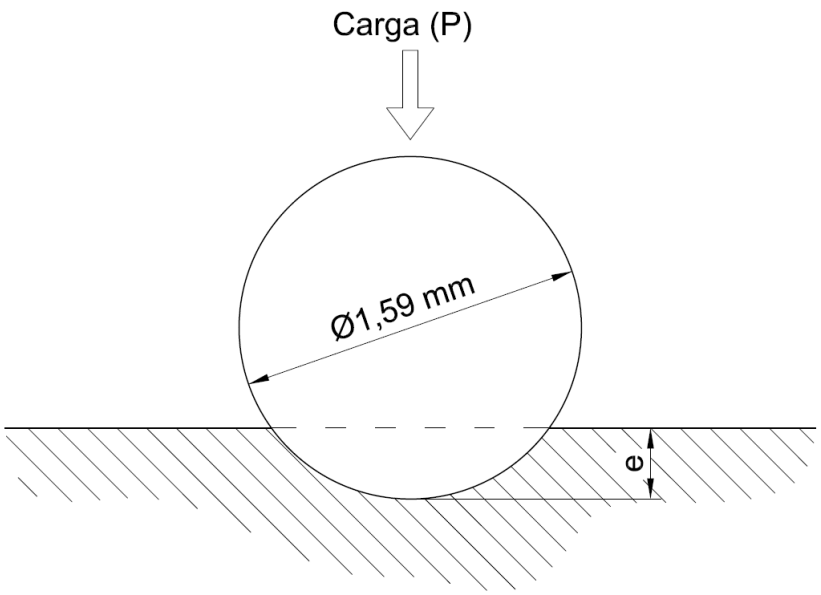


Figura 7-4. Esquema del ensayo Rockwell HRB

En resumen, el ensayo Rockwell es un tipo de ensayo apto para todo tipo de materiales y para toda clase de piezas (redondas, planas, flejes, alambres, etc.) en el que se puede medir la dureza de materiales muy duros. Al usar penetradores más pequeños que el ensayo Brinell, las huellas que deja el ensayo Rockwell son casi inapreciables y las muestras pueden ser más delgadas e incluso puede realizarse después del rectificado.

La Tabla 7-3 recoge las equivalencias entre los distintos índices de dureza.

Tabla 7-3. Equivalencias de dureza superficial para distintos ensayos de dureza.

Dureza Brinell HB	Dureza Rockwell		Dureza Vickers	Dureza Brinell HB	Dureza Rockwell		Dureza Vickers
	HRB	HRC			HRB	HRC	
80	36,4		80	359		37,0	360
85	42,4		85	368		38,0	370
90	47,4		90	376		38,9	380
95	52,0		95	385		39,8	390
100	56,4		100	392		40,7	400
105	60,0		105	400		41,5	410
110	63,4		110	408		42,4	420
115	66,4		115	415		43,2	430
120	69,4		120	423		44,0	440
125	72,0		125	430		44,8	450
130	74,4		130			45,5	460
135	76,4		135			46,3	470
140	78,4		140			47,0	480
145	80,4		145			47,7	490
150	82,2		150			48,8	500
155	83,8		155			49,0	510
160	85,4		160			49,8	520
165	86,8		165			50,3	530
170	88,2		170			50,9	540
175	89,6		175			51,5	550
180	90,8		180			52,1	560
185	91,8		185			52,7	570
190	93,0		190			53,3	580
195	94,0		195			53,8	590
200	95,0		200			54,4	600
205	95,8		205			54,9	610
210	96,6		210			55,4	620
215	97,6		215			55,9	630
220	98,2		220			56,4	640
225	99,0		225			56,9	650
230		19,2	230			57,4	660
235		20,3	235			57,9	670
240		21,3	240			58,4	680
245		22,1	245			58,9	690
250		23,0	250			59,3	700
255		23,8	255			60,2	720
260		24,6	260			61,1	740
265		25,4	265			61,9	760
270		26,2	270			62,7	780

Dureza Brinell HB	Dureza Rockwell		Dureza Vickers	Dureza Brinell HB	Dureza Rockwell		Dureza Vickers
	HRB	HRC			HRB	HRC	
275		26,9	275			63,5	800
280		27,6	280			64,3	820
285		28,3	285			65,0	840
290		29,0	290			65,7	860
295		29,6	295			66,3	880
300		30,0	300			66,9	900
310		31,5	310			67,5	920
320		32,7	320			68,0	940
330		33,9	330				
340		34,9	340				
350		36,0	350				

7.2 Problemas resueltos

7.2.1 Problema 1

En el Laboratorio de Metrología de la UAL se ha realizado un ensayo de dureza Brinell sobre una lámina de acero. El penetrador utilizado ha sido una bola de acero de 2,5 mm de diámetro y la carga aplicada de 125 kp durante 10 s en cada ensayo. El ensayo se ha repetido 3 veces y en cada ensayo se han tomado 3 medidas del diámetro de la huella dejada por el penetrador en la lámina, obteniendo los siguientes resultados:

	Ensayos		
	1	**2**	**3**
Diámetro de huella (d) en µm	**947,6**	**990,2**	**960,2**
	936,8	**990,5**	**974,1**
	940,7	**1040,4**	**930,1**

Se pide determinar el índice de dureza Brinell del acero.

Para resolver el problema, el primer paso es realizar el estudio estadístico de los datos utilizados para concretar cuál es el diámetro final de la huella dejada por el penetrador en la lámina:

	Ensayos		
	1	2	3
Diámetro de huella (d) en µm	947,6	990,2	960,2
	936,8	990,5	974,1
	940,7	1040,4	930,1
Media	967,84		
Desviación	35,20		

Por tanto, el diámetro final de la huella será:

$$d = 967{,}8 \pm 70{,}4\ \mu\text{m}\ (k = 2)$$

Ya se disponen de todos los datos necesarios para calcular la dureza Brinell del material:

$$HB = \frac{P}{\pi \cdot D \cdot f} = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)}$$

$$HB = \frac{2 \cdot 125}{\pi \cdot 2{,}5 \cdot \left(2{,}5 - \sqrt{2{,}5^2 - (967{,}8 \cdot 10^{-3})^2}\right)} = 163{,}3\ {}^{\text{kp}}/_{\text{mm}^2}$$

Por tanto, el resultado del ensayo de dureza será:

$$163{,}3\ HB\ 2{,}5/125/10$$

7.2.2 Problema 2

En el Laboratorio de Metrología de la UAL se ha realizado un ensayo de dureza Vickers sobre una pieza de acero inoxidable con una carga de 30 kp. El ensayo se ha repetido 3 veces y en cada ensayo se han tomado 3 medidas de ambas diagonales de la huella dejada por el penetrador en la lámina, obteniendo los siguientes resultados:

	Ensayos					
	1		**2**		**3**	
	d_1	**d_2**	**d_1**	**d_2**	**d_1**	**d_2**
µm	**645,0**	**631,5**	**618,5**	**548,4**	**612,7**	**626,6**
	651,3	**638,2**	**623,4**	**555,7**	**621,9**	**634,5**
	648,3	**635,5**	**615,9**	**546,6**	**617,8**	**627,2**

Se pide determinar la dureza Vickers del acero inoxidable.

El primer paso es calcular el valor final de cada una de las diagonales de la huella dejada por el penetrador en la superficie del acero inoxidable.

	Ensayos					
	1		2		3	
	d_1	d_2	d_1	d_2	d_1	d_2
µm	645,0	631,5	618,5	548,4	612,7	626,6
	651,3	638,2	623,4	555,7	621,9	634,5
	648,3	635,5	615,9	546,6	617,8	627,2
Media	648,2	635,1	619,3	550,2	617,5	629,4
Desviación	3,2	3,4	3,8	4,8	4,6	4,4
Media d_1	628,3					
Desviación d_1	6,8					
Media d_2	604,9					
Desviación d_2	7,3					

Por tanto, los valores de cada una de las diagonales de la pirámide son:

$$d_1 = 628{,}3 \pm 13{,}6\ \mu\text{m}\ (k = 2) \qquad d_2 = 604{,}9 \pm 14{,}6\ \mu\text{m}\ (k = 2)$$

De modo que el diámetro d a utilizar en la expresión de Vickers será la media de las dos diagonales anteriores:

$$d = 616{,}6\ \mu\text{m}$$

Calculando:

$$HV = 1{,}8544 \cdot \frac{P}{d^2} = 1{,}8544 \cdot \frac{30}{(616{,}6 \cdot 10^{-3})^2} = 146{,}32\ \frac{\text{kp}}{\text{mm}^2}$$

Por tanto, el resultado del ensayo de dureza será:

$$146{,}32\ HV\ 30$$

7.3 Problemas propuestos

7.3.1 Problema propuesto 1

En la determinación de la dureza de un engranaje cuya capa superficial ha sido cementada, se procede de la siguiente forma:

1) En la zona central, no cementada, se determina la dureza Brinell, aplicando una carga del 187,5 kp durante 20 s y utilizando como penetrador una bola de 2,5 mm de diámetro. La dureza calculada es 380 HB.
2) En la zona exterior, cementada, se determina la dureza Vickers, aplicando una carga de 30 kp y obteniéndose una huella cuyas diagonales son de 0,262 mm y 0,264 mm.

Calcular el diámetro de la huella obtenida en el ensayo Brinell y el índice de dureza Vickers obtenido.

$$\boldsymbol{Solución: d = 0,7826\ mm.\ 804,3\ HV\ 30}$$

7.3.2 Problema propuesto 2

Se quiere analizar la dureza de una pieza formada por una placa de acero templada y otra placa de acero normal. Determinar:

1) La dureza Brinell de la placa de acero normal si se emplea como penetrador una bola de 10 mm de diámetro aplicando una carga de 3000 kp durante 10 s obteniéndose una huella de 4 mm de diámetro.
2) La dureza Vickers de la placa templada si con carga de 10 kp se obtienen unos valores de diagonales de huella de 0,115 mm y 0,120 mm.

$$\boldsymbol{Solución: 228,8\ HV\ 10/3000/10.\ 1343,2\ HV\ 10}$$

7.3.3 Problema propuesto 3

Para determinar la dureza Brinell de un material se ha utilizado una boda de 5 mm de diámetro y se ha realizado el ensayo con una carga de 250 kp aplicada durante 10 s, obteniéndose una huella de 2,5 mm de diámetro. Calcular la dureza Brinell del material y la profundidad de la huella producida. En caso de que el índice de dureza Brinell del material coincidiera con el índice de dureza Vickers, averiguar el valor promedio de las diagonales de la huella que se obtendría en dicho ensayo para una carga de 30 kp.

$$\boldsymbol{Solución: 47,5\ HB\ 5\ 250\ 10.\ f = 0,33\ mm.\ d = 1,08\ mm}$$

Bibliografía

Real Decreto 2023/2009, de 30 de diciembre, por el que se establecen las unidades legales de medida.

"El Sistema Internacional de Unidades". Centro Español de Metrología. 2006.

"Vocabulario Internacional de Metrología: Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados". Centro Español de Metrología. 2012.

"Evaluación de datos de medición. Guía para la expresión de la incertidumbre de medida". Centro Español de Metrología. 2008.

Comité de Metrología. "Condiciones ambientales de un laboratorio de metrología". Asociación Española para la Calidad. 2008.

"Manual de Calibración". Asociación Española para la Calidad. 1982.

"Metrología del acabado superficial: rugosidad". Asociación Española para la Calidad. 1993.

Sánchez A.M. "Fundamentos de Metrología". Ed, Servicio de Publicaciones de la ETS de Ingenieros Industriales de la UPM. 1999.

C.J. Luis Pérez et al. "Guiones de Prácticas de Metrología Dimensional". Universidad Pública de Navarra. 2001.

Creus, A. "Instrumentos industriales. Su ajuste y calibración". Ed. Alfaomega. 1995.

L. Sevilla Hurtado y M.J. Martín Sánchez. “Metrología Dimensional”. Universidad de Málaga. 2002.

A. Ventura y J.J. Sanabria. “Metrotecnia en la ingeniería mecánica”. Universidad de Valladolid. 2005

M. Moro. “Fundamentos de metrología dimensional”. Marcombo. 2016.

Formulario

Incertidumbre

Expresión final de una medida:

$$M = m \pm u\ (k = 1{,}2{,}3)\ unidades$$

Media aritmética:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}$$

Desviación típica estándar:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Incertidumbre típica de medida:

$$u = k \cdot s$$

Incertidumbre típica combinada:

$$u_c{}^2(y) = \sum_{i=1}^{N} \left[\frac{\partial f}{\partial x_i}\right]^2 \cdot u^2(x_i)$$

Incertidumbre típica expandida:

$$U = k \cdot\ u_c\ (y)$$

Evaluación de incertidumbre tipo A:

$$u(x_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}}$$

Evaluación de incertidumbre tipo B:

$$u\ (y) = \frac{U}{k} \qquad u_{res}\ (y) = \frac{\delta y}{\sqrt{12}}$$

Criterios de rechazo de datos

Índice de Dixon:

$$Q_{cal} = \left|\frac{x_q - x_n}{x_h - x_l}\right|$$

Índice de Grubbs:

$$T_{cal} = \frac{|x_i - \bar{x}|}{s}$$

Criterio de Chauvenet:

$$|x_i - \bar{x}| > k_n \cdot s$$

Calibración de un instrumento de medida

Incertidumbre típica combinada de un conjunto de BPL:

$$u_{pi} = k_i \sqrt{\sum_{j=1}^{n} \left(\frac{u_{xj}}{k_j}\right)^2}$$

Corrección de calibración:

$$Cci = Xpi - Xci = Dimensión\ real\ BPL - Valor\ medio\ medido$$

Incertidumbre expandida para cada punto de calibración:

$$U_i = k \cdot \sqrt{\left(\frac{u_{pi}}{k_i}\right)^2 + Sci^2 \left(\frac{1}{n_c} + \frac{1}{n}\right) + \frac{Cci^2}{9}}$$

Rugosidad superficial

Altura de las irregularidades en diez puntos (R_z):

$$R_z = \frac{\sum_1^5 y_{Pi} + \sum_1^5 y_{Vi}}{5}$$

Altura media de las irregularidades del perfil (R_C):

$$R_C = \frac{\sum_1^n y_{Pi} + \sum_1^n y_{Vi}}{n}$$

Relación de longitud del perfil (L_r):

$$L_r = \frac{L_0}{L_B}$$

Longitud portante del perfil (μ_p):

$$\mu_P = b_1 + b_2 + \cdots + b_n$$

Tasa de longitud portante (t_p):

$$t_P = \frac{\mu_P}{L_B}$$

Dureza superficial

Ensayo de dureza Brinell:

$$HB = \frac{P}{S}\left[\frac{kp}{mm^2}\right]$$

$$HB = \frac{P}{S} = \frac{P}{\pi \cdot D \cdot f}$$

$$HB = \frac{P}{\pi \cdot D \cdot f} = \frac{2P}{\pi \cdot D \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)}$$

Ensayo de dureza Vickers:

$$HV = \frac{P}{S} = 1{,}8544 \cdot \frac{P}{d^2}\left[\frac{kp}{mm^2}\right]$$

ANEXOS

ANEXO I: BLOQUES PATRÓN LONGITUDINALES

Datos calibración juego BPL – Certificado Nº F041443-23

Número de bloques: 88

Material Acero

Marca TESA

Calidad 2

Numero caja: T02 90 103

Número identificación: s/n

Nº	Número de referencia del bloque patrón	L Valor nominal del bloque patrón (mm)	Lc Valor medido del bloque patrón (mm)	u_{xj} Incertidumbre asociada al bloque patrón k=2 (µm)
1	98689	0,5	0,50027	0,05
2	98229	1	1,00013	0,05
3	98177	1,0005	1,00063	0,05
4	98231	1,001	1,00079	0,05
5	98138	1,002	1,00163	0,03
6	98712	1,003	1,00317	0,12
7	98450	1,004	1,00425	0,04
8	98937	1,005	1,00484	0,06
9	98020	1,006	1,00633	0,06
10	98354	1,007	1,00676	0,06
11	98273	1,008	1,00767	0,03
12	98185	1,009	1,00874	0,04
13	98859	1,01	1,00961	0,06
14	98485	1,02	1,0201	0,03
15	98835	1,03	1,03022	0,03
16	98877	1,04	1,03977	0,05
17	98108	1,05	1,05013	0,05
18	98513	1,06	1,06021	0,05
19	98548	1,07	1,07017	0,04
20	98575	1,08	1,0798	0,12
21	98133	1,09	1,09016	0,05
22	98448	1,1	1,10025	0,07
23	98200	1,11	1,11023	0,04

Nº	Número de referencia del bloque patrón	L Valor nominal del bloque patrón (mm)	Lc Valor medido del bloque patrón (mm)	u_{xj} Incertidumbre asociada al bloque patrón k=2 (µm)
24	98787	1,12	1,11977	0,07
25	98852	1,13	1,12964	0,03
26	98201	1,14	1,14019	0,05
27	98591	1,15	1,15039	0,02
28	98172	1,16	1,16034	0,05
29	98575	1,17	1,16967	0,1
30	98487	1,18	1,1802	0,05
31	97644	1,19	1,19019	0,1
32	98430	1,2	1,20016	0,06
33	98564	1,21	1,21027	0,04
34	98481	1,22	1,22019	0,05
35	98644	1,23	1,23023	0,05
36	98548	1,24	1,23971	0,03
37	98703	1,25	1,25028	0,02
38	98516	1,26	1,26017	0,04
39	98303	1,27	1,26984	0,07
40	98021	1,28	1,28014	0,06
41	98668	1,29	1,29019	0,04
42	98776	1,3	1,30012	0,12
43	98358	1,31	1,31016	0,06
44	96220	1,32	1,31963	0,03
45	98953	1,33	1,33007	0,05
46	98078	1,34	1,33971	0,04
47	98646	1,35	1,3496	0,02
48	97624	1,36	1,36019	0,02
49	98665	1,37	1,37026	0,03
50	98816	1,38	1,38028	0,02
51	98371	1,39	1,39024	0,05
52	98897	1,4	1,40016	0,03
53	98430	1,41	1,41027	0,04
54	98448	1,42	1,41973	0,05
55	98298	1,43	1,42965	0,02
56	98554	1,44	1,43977	0,05
57	98026	1,45	1,45022	0,05
58	98551	1,46	1,46026	0,03
59	98161	1,47	1,47015	0,08
60	98119	1,48	1,48021	0,09
61	98708	1,49	1,48962	0,04
62	98984	1,5	1,4997	0,07
63	98267	2	1,99985	0,02

Nº	Número de referencia del bloque patrón	L Valor nominal del bloque patrón (mm)	Lc Valor medido del bloque patrón (mm)	u_{xj} Incertidumbre asociada al bloque patrón k=2 (µm)
64	98826	2,5	2,50022	0,06
65	97552	3	2,9998	0,05
66	98688	3,5	3,49973	0,06
67	97936	4	3,9998	0,04
68	98477	4,5	4,49975	0,03
69	98829	5	5,00006	0,07
70	98003	5,5	5,50022	0,1
71	98207	6	6,00023	0,07
72	98574	6,5	6,49968	0,04
73	98181	7	6,9997	0,08
74	98983	7,5	7,49991	0,05
75	97860	8	8,00016	0,05
76	98683	8,5	8,50021	0,12
77	96798	9	8,99987	0,09
78	98738	9,5	9,49975	0,03
79	98044	10	9,99965	0,06
80	98954	20	20,00018	0,09
81	98188	30	30,00038	0,1
82	98242	40	40,0004	0,05
83	4188	50	50,00067	0,13
84	98894	60	59,99962	0,11
85	98290	70	70,00031	0,2
86	98146	80	80,00043	0,25
87	98318	90	90,00059	0,2
88	96166	100	100,00031	0,32